UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# Determinación de los conceptos técnico operativos para el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas de la Isla de San Andrés

**Jaime Andrés Carmona Ramírez**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2011

# Determinación de los conceptos técnico operativos para el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas de la Isla de San Andrés

**Jaime Andrés Carmona Ramírez**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos**

Director (a):

Ph.D. Jaime Ignacio Vélez Upegui

Codirector (a):

María Victoria Vélez Otávaro

Hidrogeología

Posgrado de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2011

*A mi familia, quienes me apoyan incondicionalmente.*

# Agradecimientos

Agradezco muy especialmente a los profesores Jaime Ignacio Vélez, María Victoria Vélez y Germán Poveda por su apoyo y seguimiento. De igual forma a la autoridad regional CORALINA por el apoyo técnico brindado y a CONSERVACION INTERNACIONAL por financiar este proyecto.

A las personas que aportaron a esta tesis de maestría Mauricio Bedoya, María Isabel Ramírez Carolina Ortiz, Carlos Restrepo y a todos los amigos, compañeros de estudio y trabajo que me acompañaron durante la realización de este trabajo.

# Resumen

El presente estudio está enfocado al estudio y modelación del acuífero kárstico de la isla de San Andrés, con el fin de cuantificar el potencial hidrogeológico del mismo, de tal forma que sirva como soporte técnico para el manejo y la gestión de las aguas subterráneas de la isla. Los resultados más relevantes han sido la modelación numérica de un medio discontinuo en un software de diferencias finitas diseñado para medios homogéneos e isotrópicos, la caracterización de la hidrología de la isla, la cuantificación de la recarga y la modelación de escenarios de explotación y cambio climático. Ha sido posible constatar que el aumento de las tasas de bombeo así como cambios drásticos en la climatología constituyen una amenaza latente para el sistema de aguas de subterráneas de la isla.

**Palabras clave:** Aguas subterráneas, acuífero kárstico, cambio climático, modelación numérica, recarga

# Abstract

This work is focused on the study and modeling of the karstic aquifer of San Andres island, in order to quantify its hydrogeological potential, so that serves as a support for handling and management of groundwater. The most important results have been numerical model of discontinuous medium in finite difference software designed for homogenous and isotropic media, the characterization of the hydrology of the island, quantification of recharge and the modeling of operational scenarios and climate change. It has been verified that the increase of pumping rates and changes in climate are a potential threat to the underwater system of the island.

**Keywords:** Groundwater, karstic aquifer, climatic change, numerical model, recharge

# Contenido

**Resumen** ..... **V**

**Abstract** ..... **V**

**Índice de figuras** ..... **IX**

**Índice de tablas** ..... **XIV**

**Introducción general** ..... **16**

**1. Metodología** ..... **20**
- **1.1 Geología** ..... **20**
- **1.2 Evaluación hidrológica** ..... **21**
- **1.3 Caracterización hidrogeoquímica** ..... **22**
- **1.4 Evaluación de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación** ..... **22**
- **1.5 Evaluación hidráulica y sistemas de flujo** ..... **23**
- **1.6 Modelo hidrogeológico conceptual** ..... **23**
- **1.7 Modelo matemático** ..... **23**

**2. Estado del arte** ..... **25**
- **2.1 Introducción** ..... **25**
- **2.2 Modelo conceptual de acuíferos kársticos** ..... **26**
  - 2.2.1 Recarga ..... 27
  - 2.2.2 Parámetros hidráulicos ..... 35
- **2.3 Modelo numérico** ..... **36**

**3. Hidrología** ..... **40**
- **3.1 Introducción** ..... **40**
- **3.2 Información hidrometeorológica** ..... **41**
- **3.3 Ciclo anual de precipitación** ..... **41**
  - 3.3.1 Variabilidad interanual de la precipitación. Relación con el macro-clima. ..... 44
- **3.4 Ciclo anual de temperatura** ..... **48**
- **3.5 Ciclo anual de la velocidad de viento zonal** ..... **49**
  - 3.5.1 Variabilidad interanual de la velocidad del viento. Relación con el macro-clima. ..... 50
- **3.6 Evapotranspiración** ..... **53**
- **3.7 Estimación de la recarga** ..... **54**
- **3.8 Identificación de señales de cambio climático** ..... **58**
  - 3.8.1 Introducción ..... 58
  - 3.8.2 Metodología ..... 59
  - 3.8.3 Resultados ..... 60

**4. Modelo conceptual** ..... **67**
- **4.1 Introducción** ..... **67**
- **4.2 Geología** ..... **68**

4.2.1 Formación San Andrés ... 68
4.2.2 Formación San Luís ... 69
4.2.3 Geología estructural ... 70
**4.3 Geometría y tipo de acuífero ... 71**
**4.4 Niveles piezométricos ... 72**
**4.5 Permeabilidades ... 73**
4.5.1 Análisis de pruebas de bombeo ... 73
**4.6 Direcciones de flujo ... 79**
**4.7 Recarga ... 79**
**4.8 Calidad de agua ... 84**
**4.9 Caudales y tipo de explotación ... 85**
**4.10 Intrusión salina ... 85**

**5. Modelo numérico ... 87**
**5.1 Introducción ... 87**
**5.2 Descripción del software ... 87**
**5.3 Geometría y tamaño de celdas ... 88**
**5.4 Condiciones de frontera ... 90**
**5.5 Conductividad ... 90**
**5.6 Otros parámetros ... 92**
**5.7 Calibración en estado permanente ... 93**
**5.8 Calibración en estado transitorio ... 95**
**5.9 Escenarios de cambio climático ... 100**

**6. Análisis de vulnerabilidad ... 102**
**6.1 Introducción ... 102**
**6.2 Método EPIK ... 104**
6.2.1 Generalidades ... 104
6.2.2 Cálculo del índice de protección F ... 110
**6.3 Método COP ... 111**
6.3.1 Generalidades ... 111
6.3.2 Factor O (Overlaying layers) ... 111
6.3.3 Factor C (flow Concentration) ... 112
6.3.4 Factor P (Precipitation) ... 113
6.3.5 Índice COP ... 113
**6.4 Aplicación de las metodologías ... 114**
6.4.1 Método EPIK ... 114
6.4.2 Método COP ... 117

**7. Análisis de demanda ... 119**
**7.1 Introducción ... 119**
**7.2 Definiciones ... 119**
**7.3 Revisión de información ... 120**
7.3.1 Plan de desarrollo 2008 – 2011 ... 120
7.3.2 Caracterización y modelación del régimen de las aguas subterráneas ... 121
7.3.3 Plan director de acueducto y alcantarillado para San Andrés, Providencia y Santa Catalina al año 2027 ... 122
7.3.4 Plan de Manejo de Aguas Subterráneas (PMAS) ... 123
7.3.5 Comparación de las proyecciones existentes para la demanda hídrica de la isla ... 123
**7.4 Datos censales ... 125**
**7.5 Índice de agua no contabilizada ... 126**
**7.6 Proyecciones de población a partir de los datos censales ... 127**
7.6.1 Métodos Tradicionales de Proyección de Población residencial ... 127

7.6.2 Proyección de población flotante ..... 128
**7.7 Escenarios de proyección de demanda ..... 128**

**8. Lineamientos técnicos para el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas ..... 131**
**8.1 Introducción ..... 131**
**8.2 Plan de Manejo de Aguas Subterráneas de la isla de San Andrés ..... 132**
**8.3 Lineamientos técnicos y operativos ..... 134**
8.3.1 Seguimiento y control ..... 134
8.3.2 Programa de Investigación ..... 136

**Referencias ..... ¡Error! Marcador no definido.**

# Índice de figuras

**Figura 1.** Localización general ..... 17

**Figura 3.** Diagrama de bloque de un paisaje kárstico (Tomado de Natural Resources of Canada... 19

**Figura 2.** Proceso de exploración hidrogeológica regional (INGEOMINAS, 2004) ..... 21

**Figura 4.** Modelo conceptual de un acuífero kárstico (Tomado de White, 2003)..... 27

**Figura 5.** Hidrógrafas de respuesta rápida, intermedia y lenta (Tomado de White, 2002) ..... 29

**Figura 6.** Comportamiento dual de un acuifero kárstico (Tomado de White, 2002)..... 29

**Figura 7.** Hidrógrafa y variación química para Big Spring durante un evento de lluvia en septiembre de 1992 (Ryan y Meiman, 1996) ..... 31

**Figura 8.** Esquema del modelo utilizado para la representación del acuífero del manantial de los Santos (Vélez et al., 1997) ..... 34

**Figura 9.** Efecto de la escala en la conductividad hidráulica en acuíferos karsticos (Tomado de Kiraly, 2003) ..... 36

**Figura 10.** Modelo de tanques (Tomado de Marechal, 2008) ..... 36

**Figura 11.** Superficie piezométrica y ruta de trazadores simulados suponiendo: a) medio poroso y b) red de canales (Tomado de Worthington, 2009)..... 39

**Figura 12.** Relación entre cabezas piezómetricas simuladas y medidas en la calibración del modelos: a) medio poroso y b) red de canales (Tomado de Worthington, 2009) ..... 39

**Figura 13.** Ciclo anual de lluvias..... 43

**Figura 14.** Anomalías mensuales del ciclo anual ..... 43

**Figura 15.** Ciclo anual promedio de las lluvias durante las fases extremas del ENSO (El Niño y La Niña), así como durante épocas normales. ..... 45

**Figura 16.** Ciclo anual promedio de las anomalías de las lluvias en los años de ocurrencia de El Niño (izquierda), y La Niña (derecha). ..... 46

**Figura 17.** Relación de la precipitación durante años La Niña y años El Niño definida como P_LaNiña/P_ElNiño (en rojo relaciones mayores de 1 y en rojo relaciones menores de 1) ..... 47

**Figura 18.** Variación del ciclo anual de lluvias en la fase cálida del fenómeno ATN-SST (derecha) y en la fase fría del fenómeno ATN-SST (izquierda) ..... 47

**Figura 19.** Influencia del fenómeno ENSO en el ciclo anual de temperatura ..... 49

**Figura 20.**Ciclo anual de la velocidad del viento (m/s) a diferentes alturas asociadas con diferentes niveles de la presión atmosférica, expresados en hPa. ..... 50

**Figura 21.** Perfil del ciclo anual de la velocidad del viento (m/s) a diferentes alturas asociadas con diferentes niveles de la presión atmosférica, expresados en hPa ..... 51

**Figura 22.** Ciclo anual de velocidad del viento zonal a distintos niveles de la atmósfera durante las dos fases del ENSO. (Izquierda) El Niño, (derecha) La Niña. ..... 51

**Figura 23.** Ciclo anual de velocidad del viento zonal a distintos niveles de la atmósfera durante las dos fases del ENSO. (Izquierda) El Niño, (derecha) La Niña. ..... 52

**Figura 24.** Cuantificación de la variación del ciclo anual de velocidad zonal durante años El Niño (derecha) y durante años La Niña (izquierda) ..... 52

**Figura 25.** Estimativos de la evapotranspiración real anual (mm) para el período 1997-2008 ..... 53

**Figura 26.** Curvas de precipitación y evapotranspiración acumuladas ..... 54

**Figura 27.** Área de estudio para la estimación de la recarga en la Isla de San Andrés (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático") ..... 56

**Figura 28.** Elementos y variables presentes en el balance hídrico celda a celda (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático") ..... 57

**Figura 29.** Número máximo de días sin lluvias al año ..... 61

**Figura 30.** Serie del número anual de días sin lluvia ..... 61

**Figura 31.** Serie del número anual de eventos de lluvia con intensidad entre 0-5 mm/d ..... 62

**Figura 32.** Serie del número anual de eventos de lluvia con intensidad entre 5-10 mm/d ..... 63

**Figura 33.** Cambio en la distribución de la precipitación diaria ..... 64

**Figura 34.** Cambio en la distribución de la precipitación diaria para años El Niño ..... 65

**Figura 35.** Cambio en la distribución de la precipitación diaria para años La Niña ..... 66

**Figura 36.** Unidades hidroestratigráficas principales de la isla de San Andrés (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático") ..... 71

**Figura 37.** Esquema de la geometría del modelo hidrogeológico conceptual (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático") ..... 72

**Figura 38.** Concepto de doble porosidad..... 74

**Figura 39.** Concepto de doble porosidad y recubrimiento (Moench, 1984)..... 74

**Figura 40.** Análisis prueba de bombeo pozo 6 (Método Doble Porosidad) ..... 76

**Figura 41.** Análisis prueba de bombeo pozo 6 (Método Theis) ..... 76

**Figura 42.** Análisis prueba de bombeo pozo 6 (Método Moench, 1984, 1994) ..... 77

**Figura 43.** Variación especial de la permeabilidad en la cuenca del Cove según varios métodos de análisis..... 78

**Figura 44.** Esquema de direcciones de flujo del agua subterránea en la isla (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático") ..... 80

**Figura 45.** Metodología para la estimación de la recarga propuesta por Témez, 1977 ..... 81

**Figura 46.** Esquema del modelo conceptual de modelo pluricelular englobado (Modificado de Sauquillo, 1983 y Vélez et al., 1997) ..... 83

**Figura 47.** Simulación de los niveles piezométricos para el Pozo 8. Correlación 0.69..... 84

**Figura 48.** Vista tridimensional del modelo numérico, incluyendo profundidades batimétricas. En verde las zonas correspondientes a la formación San Andrés (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático")..... 89

**Figura 49.** Zonificación de la conductividad hidráulica..... 91

**Figura 50.** Resultados de la calibración en estado permanente ..... 95

**Figura 51.** Vista en perfil de distribución de cloruros en la vertical en un perfil esquemático N-S. 95

**Figura 52.** Niveles Observados vs. Calculados para los diferentes periodos de estrés ..... 97

**Figura 53.** Superficie piezométrica calculada por el modelo para periodo de estrés 1 (147 días) ... 98

**Figura 54.** Superficie piezométrica calculada por el modelo para periodo de estrés 2 (365 días) ... 98

**Figura 55.** Superficie piezométrica calculada por el modelo para periodo de estrés 3 (515 días) ... 99

**Figura 56.** Superficie piezométrica calculada por el modelo para periodo de estrés 4 (731 días) ... 99

**Figura 57.** Mapa de vulnerabilidad intríseca INGEOMINAS (PMAS, 1999) ..... 104

**Figura 58.** Ilustración de las diferentes formas de cobertura (Doerfliger, 1998) ..... 107

**Figura 59.** Condiciones de infiltración para zonas por fuera de la cuenca del sumidero. Caso B, método EPIK (Doerfliger, 1998)..... 108

**Figura 60.** Diagrama del método COP, mostrando la diferenciación de los factores C, P y O (Vías et al., 2006)..... 115

**Figura 61.** Mapa de vulnerabilidad intrínseca obtenido a partir del método EPIK..... 116

**Figura 62.** Mapa de vulnerabilidad intrínseca obtenido a partir del método COP..... 118

**Figura 63.** Demanda de agua no abastecida para un escenario optimista ..... 135

# Índice de tablas

**Tabla 1.** Resultados de la modelación para las simulaciones de medio poroso y de acuífero kárstico ..... 39

**Tabla 2.** Información de estaciones operadas por el IDEAM en la Isla de San Andrés, Colombia . 41

**Tabla 3.** Información de las estaciones de precipitación ..... 42

**Tabla 4.** Datos de las variables macroclimáticas empleadas (Fuente: NOAA) ..... 44

**Tabla 5.** Datos de la estación de radiosonda del aeropuerto Sesquicentenario ..... 48

**Tabla 6.** Valores de recarga estimados en trabajos anteriores ..... 55

**Tabla 7.** Recarga promedio para un año seco, húmedo y normal ..... 57

**Tabla 8.** Valores de recarga para las diferentes condiciones de lluvia ..... 79

**Tabla 9.** Valores de los parámetros iniciales del modelo de tanques ..... 84

**Tabla 10.** Parámetros y unidades utilizadas en la implementación del modelo numérico ..... 92

**Tabla 11.** Niveles de cabeza piezométricas usadas para la calibración en estado transitorio ..... 93

**Tabla 12.** Comparación de los parámetros de calibración del modelo numérico en estado permanente ..... 94

**Tabla 13.** Asignación de los períodos de estrés ..... 96

**Tabla 14.** Estadísticos de la calibración en estado transitorio ..... 97

**Tabla 15.** Valores de categorías E, P, I, K, m..... 110

**Tabla 16.** Pesos asignados según cada parámetro, método EPIK ..... 110

**Tabla 17.** Rangos de clasificación de vulnerabilidad según índice F, método EPIK ..... 110

**Tabla 18.** Continuidad del servicio de acueducto en la isla de San Andrés ..... 120

**Tabla 19.** Dotación y proyección de demanda de agua por sectores (Ingestudios, 1996)..... 122

**Tabla 20.** Dotaciones por tipo de usuario según el estudio de Ángel y Rodríguez ..... 122

**Tabla 21.** Cálculo de demandas promedio según el PMAS ..... 123

**Tabla 22.** Proyección de demanda residencial ..... 123

**Tabla 23.** Proyección de demanda población flotante..... 123

**Tabla 24.** Proyección de demanda usuarios comerciales ..... 124

**Tabla 25.** Proyección de demanda usuarios oficiales..... 124

**Tabla 26.** Proyección de demanda total..... 124

**Tabla 27.** Datos censales ..... 125

**Tabla 28.** Proyecciones de población por métodos tradicionales..... 127

**Tabla 29.** Composición de las fuentes de abastecimiento de agua en la isla..... 129

# Introducción general

Este trabajo es el resultado final del estudio 'Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático' (UNAL, 2010). En dicho estudio se realizó: el análisis de los diferentes modelos numéricos y conceptuales desarrollados para la isla de San Andrés, la implementación de un modelo numérico en el software de diferencias finitas MODFLOW, la evaluación del comportamiento del acuífero ante escenarios de cambio climático, el análisis hidrológico de series de precipitación, temperatura y vientos, la evaluación de la demanda hídrica y la exploración de alternativas paralelas de abastecimiento. El presente trabajo recopila los principales resultados del estudio y presenta nuevos análisis relacionados con: la adaptación de un modelo conceptual de tanques para la simulación de niveles piezométricos, la búsqueda de señales de cambio climático en series de precipitación y temperatura y la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero. De igual forma se presenta el estado del arte en materia de acuíferos kársticos y como conclusión final los conceptos técnicos derivados de este estudio como insumo para el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas de la isla. Estos conceptos deben estar enfocados a la preservación del recurso hídrico disponible, la garantía de la dotación mínima vital para la población residente y el planteamiento de alternativas paralelas de abastecimiento.

## Localización

La isla de San Andrés se localiza en el mar Caribe, al occidente colombiano, alrededor de los 81.4° longitud oeste y los 12.5° latitud norte, como se muestra en la Figura 1. La isla tiene una extensión en tierra de 27 $km^2$ y un área marina de 250.000 $km^2$. Al norte limita con Jamaica, Haití, República Dominicana; al oriente con el mar Caribe; al noroccidente con Honduras; al occidente con Nicaragua, al suroccidente con Costa Rica y al sur con Panamá. Su población total es de 65.627 habitantes (DANE, 2005) y una población flotante anual (turística básicamente) de 350.000 personas entre nacionales y extranjeros según datos de la Secretaría de Turismo en 2008 (PMAS, 1999). De igual forma en la **Figura 1** se muestra la localización de la cuenca del Cove, ubicada en

la parte central de la isla de San Andrés y en donde se encuentra el acuífero más productivo, por lo que gran parte del estudio está centrado en dicha zona.

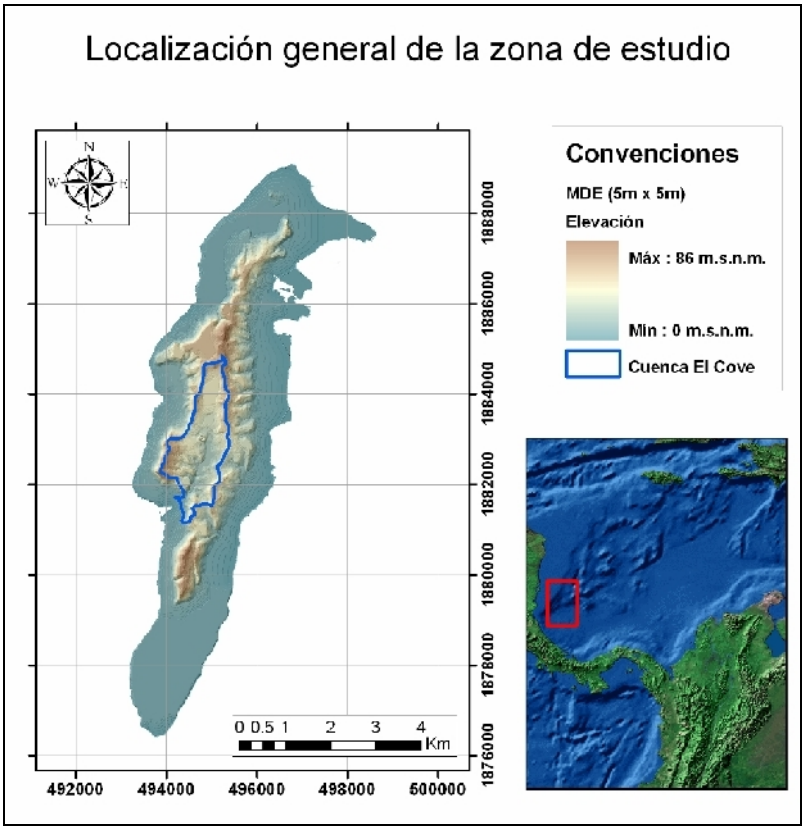


Figura 1. Localización general

# Objetivos

- ## General

Determinar las componentes técnicas y operativas que sirvan como base para la construcción de un Plan de Manejo de Aguas Subterráneas para la Isla de San Andrés

- ## Específicos

– Refinar el modelo numérico existente, de tal forma que describa adecuadamente el comportamiento del acuífero kárstico de la Isla de San Andrés.

- Evaluar escenarios de demanda y escenarios de cambio climático para la Isla de San Andrés.

- Elaborar estrategias que involucren diferentes sistemas de abastecimiento, de tal forma que se garantice una dotación mínima vital a la población residente.

- Estimar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero kárstico de la Isla de San Andrés.

## Definición de karst

El término karst se origina del nombre geográfico de una región ubicada en el noroeste de la antigua Yugoslavia y ahora perteneciente a Croacia y Eslovenia donde predominan este tipo de formaciones. Los paisajes kársticos son resultado de numerosos procesos que ocurren en diversos tipos de rocas solubles y bajo diversas condiciones geológicas y climáticas por lo que se presentan muchos tipos de karst (Milanovic, 1979); sin embargo en general los karst se caracterizan por la presencia de cavernas, dolinas (cavernas colapsadas), conductos, manantiales superficiales y submarinos, ríos intermitentes, ríos subterráneos, entre otros tipos de formaciones que tengan génesis en la disolución de rocas; un sistema kárstico típico es el mostrado en la Figura 2. Según Milanovic (1979), la definición generalmente aceptada es la dada por Popov en 1959, “El término karst aplica a un conjunto de procesos geológicos y de fenómenos asociados a éstos que se dan en la corteza terrestre y en su superficie, a saber el fenómeno producido por la disolución de rocas que se manifiesta por la formación de conductos, la destrucción y alteración de la estructura de las rocas, la creación de un régimen de circulación de agua subterránea especial y caracterizada por una topografía regional y una red de drenaje especial”.

Los tipos de rocas susceptibles al proceso de karstificación están extensamente distribuidas en todo el mundo; sin embargo las zonas kársticas mejor estudiadas se encuentran en el suroeste de la China en el área Guilin, las cuevas de Mammoth, Kentucky (USA), las Islas Griegas, Dordogne, Vercors y Tarns en Francia, las cuevas de Postojna en Eslovenia y la zona de Burren en Irlanda.

De otro lado, los acuíferos kársticos son reservas de agua que se dan en este tipo de formaciones y en donde el agua se almacena principalmente en la matriz porosa del suelo y en menor medida en redes de fracturas, conductos y cavernas subterráneas, y que presentan características muy particulares de circulación de agua. Éstas características están dadas por la velocidad de circulación

del agua a través del acuífero y difieren mucho de las presentadas en los acuíferos de medios porosos.

En un acuífero kárstico se dan en general dos tipos de flujo; en primer lugar un flujo lento a través de la matriz porosa del suelo y de la red de fracturas de menor diámetro y en segundo lugar un flujo rápido a través de la red de conductos y cavernas. Esta particularidad le confiere características hidráulicas que no pueden ser determinadas a través de los métodos tradicionales que son aplicables a medios homogéneos e isotrópicos.

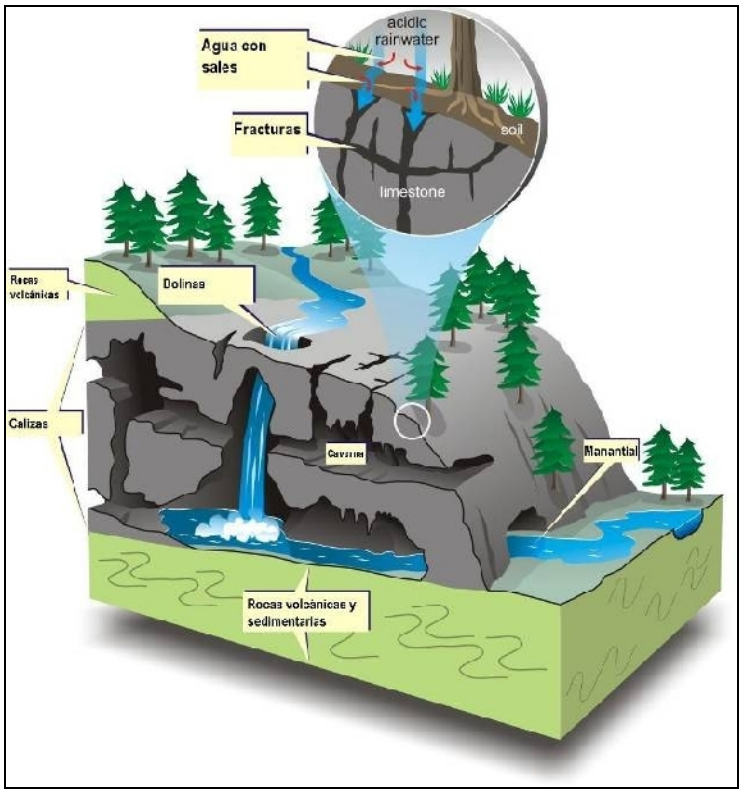


Figura 2. Diagrama de bloque de un paisaje kárstico (Tomado de Natural Resources of Canada

# 1. Metodología

En el documento “Programa de Exploración de Aguas Subterráneas” (INGEOMINAS, 2004), se definen los componentes básicos para la exploración y evaluación de aguas subterráneas. Los pasos para obtener un modelo hidrogeológico conceptual, del cual se derivan el modelo numérico y posteriormente la evaluación del acuífero son: geología, exploración geofísica, reconocimiento hidrogeológico, perforación exploratoria, evaluación hidrodinámica, caracterización hidrogeoquímica, evaluación hidrológica y evaluación de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación. El mapa conceptual de la Figura 3 muestra los pasos y el orden en que se deberán dar, en un proceso de exploración, siendo el modelo hidrogeológico conceptual el resultado más importante para la evaluación del agua subterránea, ya que es la base para el conocimiento del funcionamiento del sistema y para la gestión del recurso hídrico.

## 1.1 Geología

La geología es la información base para los estudios hidrogeológicos ya que define las propiedades de las rocas y las estructuras geológicas, que son los elementos básicos que definen la capacidad almacenamiento y las condiciones de flujo de los sistemas subterráneos. La cartografía geológica debe realizarse haciendo énfasis en la litología, textura, cambios de facies, tipo de porosidad, ambientes de depositación, estructuras tectónicas y geomorfológicas, así como composición mineralógica de los sedimentos y rocas.

Una buena interpretación geológica parte de un trabajo previo de fotointerpretación y análisis de información existente, complementada de un trabajo de campo detallado y diferentes técnicas como, sedimentología, vulcanología, geología estructural, levantamiento de secuencias estratigráficas, entre otras. Es importante además detallar el grado y dirección de fracturamiento de las rocas, así como las condiciones de conductividad hidráulica de la misma.

De igual forma, las estructuras geomorfológicas juegan un papel fundamental en la forma como se infiltra y se transmite el agua, por lo que el buen conocimiento de éstas permite determinar zonas preferenciales de recarga y descarga. En particular, los acuíferos kársticos poseen características que los diferencian fuertemente de los acuíferos de medios porosos, dada la presencia de sistemas de conductos y cavernas; dependiendo del grado de desarrollo del karst se determinan las formas de infiltración y la velocidad de flujo.

Para el estudio hidrogeológico de la isla de San Andrés se usó principalmente información secundaria de geología, de reconocimiento hidrogeológico y de análisis de exploración geofísica para ser refinada a partir de los registros de perforación pozos.

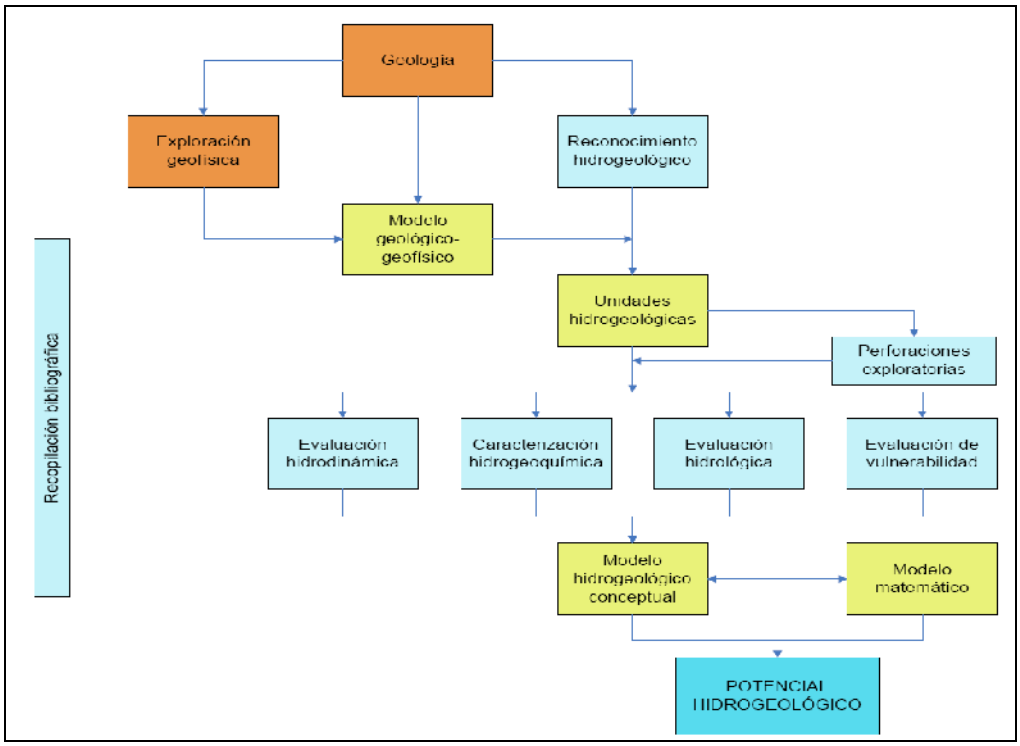


Figura 3. Proceso de exploración hidrogeológica regional (INGEOMINAS, 2004)

## 1.2 Evaluación hidrológica

La caracterización de las variables hidrometeorológicas de la zona de estudio es de vital importancia en la construcción del modelo conceptual, ya que, en este caso en particular la recarga potencial del acuífero proviene básicamente de la precipitación. Las principales variables

atmosféricas que afectan el proceso de recarga del acuífero son la precipitación y la evapotranspiración; en la primera juega un papel importante la distribución espacio temporal de la cantidad de lluvia. De otro lado, la evapotranspiración es una variable estimada indirectamente a partir de los valores de temperatura y la velocidad de viento dada la dificultad para su medición.

La evaluación hidrológica para la isla de San Andrés se realizó con base en información de tres estaciones de precipitación del IDEAM y con datos de radiosonda lanzada desde el aeropuerto para los datos de temperatura y velocidad de viento. Se obtuvieron los ciclos anuales de precipitación, evapotranspiración y vientos, así como la variación de los mismos ante la ocurrencia de los fenómenos macroclimáticos ENSO (*El Niño Southern Oscillation*). Igualmente se presenta el análisis de las señales de cambio climático

## 1.3 Caracterización hidrogeoquímica

Con la hidrogeoquímica se pueden determinar el origen, los procesos y la evolución de la composición del agua almacenada en los acuíferos. Ésta es una herramienta básica que además de determinar la calidad natural del agua para diferentes usos, mediante análisis fisicoquímicos e isotópicos, aporta la siguiente información al modelo hidrogeológico conceptual: Identificación de zonas de recarga y descarga, dirección del flujo subterráneo, mezclas e interconexiones de agua de diferentes orígenes (aguas superficiales y subterráneas, entre acuíferos), origen del agua subterránea, tiempo de residencia de las aguas subterráneas, identificación de ocurrencias de aguas termales y minerales.

## 1.4 Evaluación de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación depende de las características litológicas de la zona no saturada, del tipo de acuífero, de la profundidad del nivel del agua para el acuífero libre o de la profundidad del techo del acuífero confinado. La vulnerabilidad debe ser revisada periódicamente ya que algunas de las variables involucradas son temporales, dependiendo de situaciones particulares como por ejemplo el avance o retroceso de la cuña salina, vertederos de desechos, sistemas de riego en zonas agrícolas con uso intensivo de agroquímicos, descargas de sistemas de alcantarillado o plantas de tratamiento de aguas servidas.

## 1.5 Evaluación hidráulica y sistemas de flujo

Con la evaluación hidrodinámica de las aguas subterráneas se pueden determinar la altura piezométrica, el gradiente y los parámetros hidráulicos del acuífero (conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento) que caracterizan el flujo y almacenamiento de agua en los diferentes acuíferos. En este trabajo se muestra el análisis de pruebas de bombeo en diferentes pozos mediante técnicas utilizadas para pruebas en medios fracturados.

## 1.6 Modelo hidrogeológico conceptual

El conocimiento hidrogeológico del área se representa a través del modelo hidrogeológico conceptual, el cual es un esquema lógico, que describe las propiedades, condiciones, procesos y potencialidades de los acuíferos. Este modelo permite entender el funcionamiento de los acuíferos para predecir su comportamiento y determinar sus recursos explotables; además, es útil para prever posibles impactos ambientales sobre el sistema, para cuantificar su aprovechamiento o para la gestión integral del recurso hídrico.

El modelo conceptual se construye cuando se han acumulado suficientes datos sobre los materiales geológicos del subsuelo, la forma como circula el agua subterránea y las zonas de recarga y descarga del acuífero.

## 1.7 Modelo matemático

Es una representación de la circulación del flujo de agua subterránea, por medio de ecuaciones. Un modelo matemático permite hacer simulaciones del comportamiento de los niveles de agua, las direcciones de flujo y los caudales de explotación.

Los modelos conceptual y matemático posibilitan la evaluación del potencial hidrogeológico desde el punto de vista técnico y económico. Los modelos matemáticos son útiles entre otras cosas para la evaluación regional del recurso agua subterránea, predicción de efectos de posibles abatimientos, delimitación de zonas de protección, diseño de redes de monitoreo, evaluación de riesgo de contaminación, reglamentación del recurso.

En este trabajo la modelación numérica se realizo en el programa, Visual MODFLOW 2009.1, desarrollado por el USGS (United States Geological Survey). Es necesario destacar que este modelo está desarrollado para simulación de acuíferos de medios porosos, bajo la suposición de continuidad y homogeneidad de las propiedades hidráulicas, por lo que su aplicación en un sistema altamente heterogéneo, con presencia de conductos y cavernas no exploradas, además de la carencia de información geológica detallada, de pruebas isotópicas o de hidrogeoquímica, implica un alto grado de dificultad en la simulación. Por tanto durante el desarrollo del modelo numérico se hicieron suposiciones tales como zonas de alta permeabilidad en fallas y lineamientos, análisis de pruebas de bombeo mediante técnicas de doble porosidad y definición de zonas de recarga especialmente en las zonas de fallas.

# 2. Estado del arte

## 2.1 Introducción

Dentro de los recursos de agua dulce explotable existentes en la Tierra, el agua subterránea constituye casi un 98% del total (Vélez, 2004), por lo cual es una fuente hídrica fundamental para el abastecimiento de la población mundial y el estudio de su dinámica es indispensable para la explotación sostenible y la protección de la misma. Los modelos conceptuales, representaciones esquemáticas de la realidad, son fundamentales para entender el comportamiento de las aguas subterráneas ya que involucran los aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrodinámicos y químicos y determinan el potencial hidrogeológico de un acuífero determinado. Del modelo conceptual se derivan el modelo numérico y el análisis de vulnerabilidad; el primero, un código computacional basado en métodos numéricos representa matemáticamente el sistema y se utiliza como una importante herramienta de predicción, planeamiento y control, y el segundo permite enfocar acciones para la protección del acuífero.

En particular el estudio de los acuíferos kársticos reviste un especial interés, toda vez que cerca del 25% de la población vive sobre estas formaciones u obtiene el agua de ellas (Ford y Williams, 1989). Sin embargo estos acuíferos poseen características muy particulares que los diferencian de otros acuíferos (de medios porosos o fracturados): alta heterogeneidad hidráulica creada y organizada por el flujo de agua, velocidad de flujo de hasta miles de m/d y recarga concentrada de fuentes superficiales. Diferentes modelos conceptuales que se reportan en la literatura tratan de tomar en cuenta estas particularidades ya que los métodos de estudio de la hidrogeología clásica son generalmente inválidos y poco exitosos en acuíferos kársticos, dado que sus resultados no pueden extenderse a todo el acuífero. En este capítulo se muestran las diferentes aproximaciones metodológicas para el estudio de los acuíferos kársticos.

## 2.2 Modelo conceptual de acuíferos kársticos

Existe una aceptación general que el mayor interés por el estudio de karst se dio en la región del Mediterráneo en especial en la región de las montañas Dinaric, en Eslovenia. Según Milanovic (1979), las investigaciones en acuíferos kársticos se remontan a la mitad del siglo XVII.

Las aproximaciones metodológicas más reconocidas están relacionadas con la descripción del sistema a partir de dos elementos principalmente; las estructuras geológicas y geomorfológicas como controladoras del flujo y la respuesta hidrodinámica del sistema a nivel local y regional.

La caracterización de los acuíferos kársticos se basó inicialmente en la identificación de todas las estructuras geológicas y su influencia en los patrones de circulación del agua (White, 1969); sin embargo la dificultad para reconocer todo el sistema de conductos y cavernas no permite entender completamente la dinámica del acuífero. Más adelante Shuster y White (1971), propusieron una tipificación a partir de la permeabilidad en “acuíferos de conductos” y “acuíferos de flujo difuso”; esta sin embargo, es una clasificación binaria inadecuada que no recoge las principales características propias de los karst, presentadas en 1986 por Smart y Hobbs, quienes identificaron tres elementos de los acuíferos kársticos que los diferencian profundamente de los acuíferos de medio porosos: los puntos de recarga, el coeficiente de almacenamiento y la permeabilidad; este, planteamiento ha sido ampliamente aceptado. Finalmente en la década de los noventa se refinó este concepto y se habla entonces de flujo a través de canales interconectados, flujo a través de las fracturas y flujo a través de la matriz porosa, así como la interacción entre ellos; del desarrollo de estos tres sistemas dependerá el comportamiento del acuífero y las respuestas a eventos de lluvia. Trabajos como el de Worthington y Ford (1995) y Kiraly (1995) aportaron en la refinación del modelo conceptual actual. La Figura 4 muestra un esquema del modelo conceptual actual de circulación de agua en un acuífero kárstico (White, 2003).

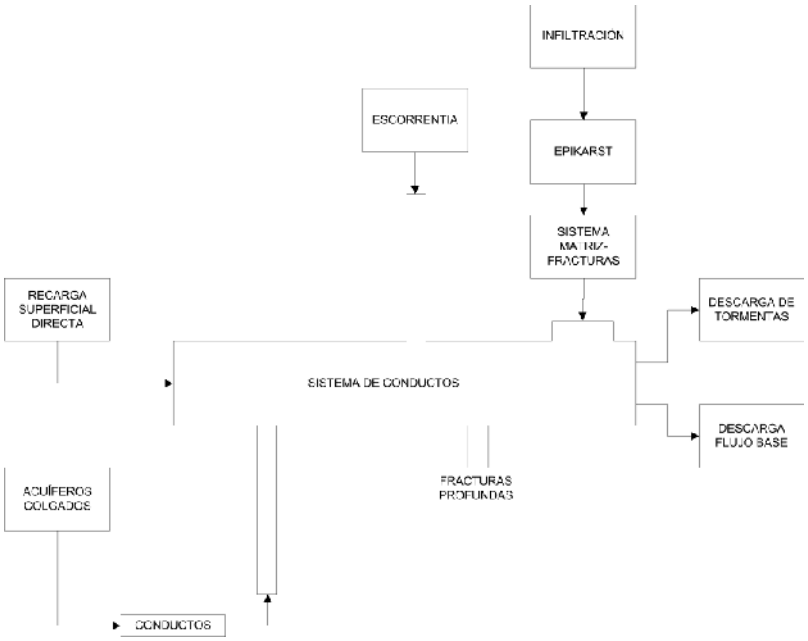


Figura 4. Modelo conceptual de un acuífero kárstico (Tomado de White, 2003)

De otro ladolas zonas de infiltración y el epikarst le confieren otras propiedades hidrogeológicas particulares a los acuíferos kársticos (Mangin 1974a, Bakalowicz 2003, 2005); el epikarst, la capa exterior de las formaciones kársticas bien desarrolladas, es una zona de intercambio entre la bio-atmósfera y el sistema kárstico, donde se almacena agua subterránea local y temporalmente, en una zona saturada colgada donde se produce y se transporta $CO_2$ en solución .La recarga ocurre directamente a través de sumideros y puntos de fractura o a través del epikarst, cuya parte saturada se convierte en la zona que alimenta la evapotranspiración de las coberturas vegetales(Bakalowicz 2005).

### 2.2.1 Recarga

La recarga es tal vez es parámetro más sensible durante la calibración de un modelo numérico, por lo que su cuantificación es de gran importancia. Los acuíferos kársticos exhiben gran variabilidad espacial y temporal de la recarga y en general se pueden reconocer al menos una de las siguientes fuentes de recarga: concentrada proveniente de cuerpos de agua superficiales a través de sumideros, concentrada proveniente de la escorrentía de eventos de lluvia a través de sumideros y dolinas, difusa proveniente de la infiltración de la lluvia a través de la zona vadosa y recarga de acuíferos colgados (White, 2003).

En general la distribución espacial de la recarga y descarga de acuíferos kársticos se ha identificado a partir de las estructuras geomorfológicas de la zona de estudio, con puntos de recarga directos como dolinas (cavernas colapsadas), zonas de falla y lineamientos y zonas de descarga en los manantiales; sin embargo también hay trabajos importantes relacionados con utilización de isótopos ambientales, trazadores e hidrogeoquímica. Respecto a la cuantificación de la recarga temporal, se obtienen resultados muy interesantes a partir de las hidrógrafas de manantiales, analizando la fluctuación del caudal o la variación de la composición química e isotópica del agua, que representa el comportamiento regional del acuífero kárstico. Este tipo de aproximación permite hacer inferencias acerca de los procesos de infiltración y de flujo subterráneo siendo la curva de recesión el análisis más utilizado.

Según White (2002), el análisis de hidrógrafas tiene una larga historia en la hidrogeología kárstica con trabajos pioneros como el de Burdon y Papakis (1963), Milanovic (1979) y Atkinson (1977) .Éste último concluyó de su trabajo en el acuífero de Mendis Hills al suroeste de Inglaterra que el 50% de las descarga de manantiales corresponde a flujo rápido y el 50% a flujo lento; además que alrededor del 92% del almacenamiento se da en el sistema de fracturas.

Un caso de aplicación reciente que ilustra la metodología es presentado por White (2002) donde se obtienen resultados como las Figura 5 y Figura 6. En la primera se muestran tres casos de aplicación de hidrógrafas en las que se observan las respuestas rápida, intermedia y lenta; la respuesta del acuífero puede presentar desde picos claramente discernibles correspondientes a tormentas puntuales hasta una respuesta donde sólo se presenta el efecto global de las temporadas húmedas y secas. El tiempo de respuesta está condicionado por lo menos por tres factores básicos: la contribución de la recarga directa de fuentes superficiales y de la escorrentía, la capacidad de transporte de la red de conductos y el área de la cuenca. De otro lado la Figura 6 muestra la regresión semilogarítmica de la respuesta de un manantial a un evento de lluvia donde se observan las dos componentes de flujo rápido y flujo lento.

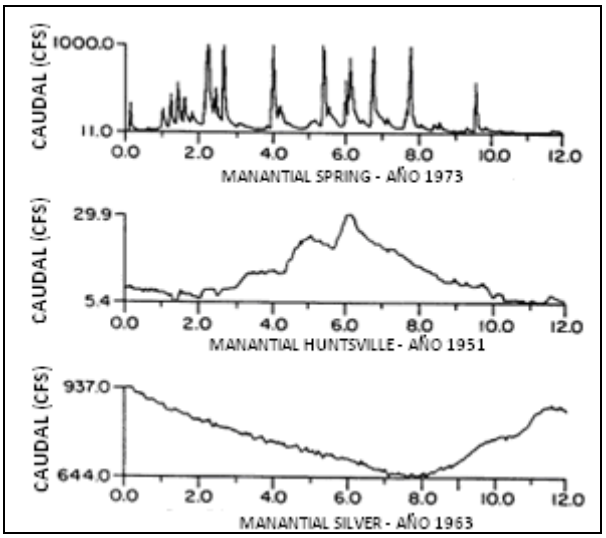


Figura 5. Hidrógrafas de respuesta rápida, intermedia y lenta (Tomado de White, 2002)

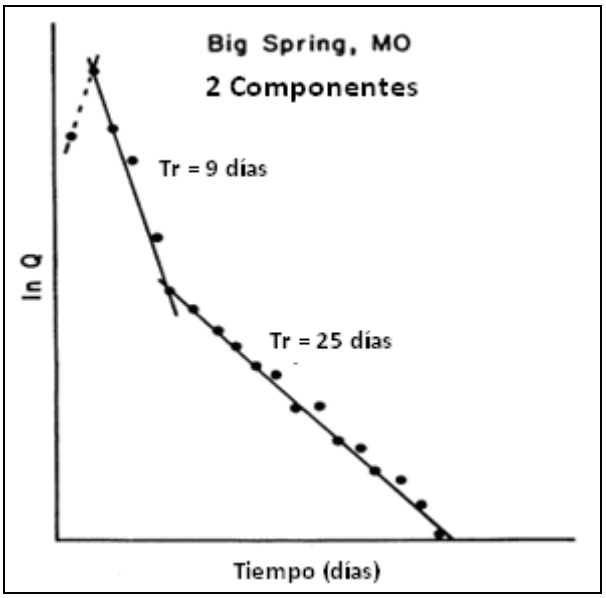


Figura 6. Comportamiento dual de un acuifero kárstico (Tomado de White, 2002)

A partir del análisis de hidrógrafas se han desarrollado trabajos interesantes como los presentados por Hao et al. (2007), donde se obtuvieron buenos resultados en la simulación de las fluctuaciones de manantiales en China a partir de un modelo basado en el sistema gris (Grey System, Deng 1982, 1985). De otro lado White (2005) presenta la contribución relativa de descarga de cada uno de los tres componentes de permeabilidad involucrados en un sistema kárstico (matriz, fracturas y conductos) y Kurtulus (2006) simuló el comportamiento de series de caudal de manantiales a partir de modelos de redes neuronales. Finalmente trabajos más recientes apuntan a determinar las consecuencias de los cambios en la cantidad y la distribución espacio-temporal de lluvia debido al

cambio climático; al respecto Fiorillo (2009) concluye, a partir del análisis de hidrógrafas y su correlación con la lluvia, que los acuíferos kársticos tienen memoria de los eventos de sequía y dadas las perspectivas de la disminución de precipitación existe un riesgo latente de agotar el acuífero.

Igualmente importante es el análisis de las variaciones químicas del agua, dado que la dureza del agua fluctúa continuamente a lo largo de las temporadas del año, e incluso en algunos puntos esta variación responde a eventos de lluvias puntuales. Al respecto Shuster y White (1971) demuestran que el coeficiente de dureza expresado como el coeficiente de variación medido en cada manantial (coeficiente de variación = desviación estándar / media) está en el rango de 1 – 2 % para un determinado conjunto de puntos que representan las descargas de manantiales alimentados por recarga lenta o difusa y entre 20 – 25 % para otro conjunto que representan los manantiales alimentados por recargas puntuales y directas. Worthington (1992) propone que el coeficiente representa el porcentaje de recarga puntual directa. En el mismo trabajo Worthington asevera que un bajo coeficiente de recarga no implica ausencia de conductos, sino que el mayor porcentaje de recarga corresponde a infiltración difusa. Por tanto el coeficiente de variación de dureza es un buen indicador para determinar los porcentajes de recarga correspondientes a fuentes superficiales y escorrentía y a recarga difusa.

Un muy buen trabajo reportado es el de Ryan y Meiman (1996) donde analizan hidrógrafas de Big Spring en la formación kárstica de Kentucky durante un registro químico horario de sólo 2.5 días. Se tomaron datos de conductividad específica, turbiedad, coliformes fecales, lluvia y caudal (Figura 7). De este análisis de tan sólo dos días y medio de registro se obtuvieron conclusiones muy importantes para entender la dinámica del acuífero; en primer lugar no existe mucha diferencia entre el evento más intenso de lluvia y la rama ascendente de la hidrógrafa. El agua de escorrentía que recarga a través de sumideros aguas arriba de la cuenca incrementa la cabeza hidráulica y obliga la salida rápida del agua almacenada; esta agua tiene composición química similar a la que se descargaba antes de la tormenta por lo no se presentan cambios en la conductividad específica. El descenso en la conductividad específica coincide con la llegada del agua procedente de la mitad de la cuenca (comprobado a partir de trazadores). Por último el agua procedente de la parte más alejada de la cuenca es la porción del caudal que carga la turbiedad y la contaminación de coliformes. Los resultados mostrados en la Figura 7 tienen importantes implicaciones para el monitoreo de las aguas subterráneas del acuífero kárstico.

Perrin et al. (2003), muestra cómo a partir de los análisis de variación temporal de la composición química del agua en diferentes puntos a lo largo de conductos de drenaje, manantiales, ríos subterráneos y varios tributarios, se obtiene un modelo conceptual que explica la variabilidad química del agua subterránea, identifica las zonas que controlan la producción de $CO_2$ y las zonas de mayor almacenamiento de agua subterránea. Karimi et al. (2005) caracterizaron el área de recarga y el funcionamiento de acuíferos kársticos en noreste de Zagros (Irán) a partir del análisis estadístico multivariado de la composición química e isotópica de diversos manantiales, concluyendo además que los principales factores que afectan la composición son la elevación, la lluvia efectiva y la producción de $CO_2$. Toran et al. (2005) usa indicadores geoquímicos (calcio, sodio y nitrato) para analizar cambios estacionales en la forma de recarga de acuíferos kársticos en el sureste de Pennsylvania (Estados Unidos)

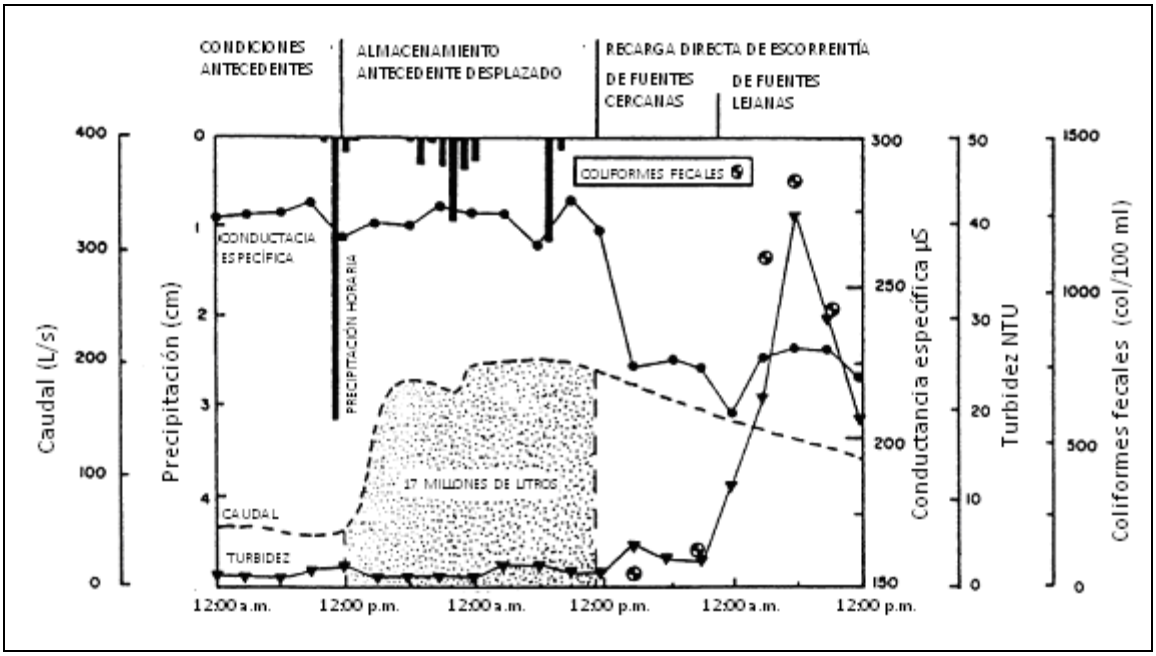


Figura 7. Hidrógrafa y variación química para Big Spring durante un evento de lluvia en septiembre de 1992 (Ryan y Meiman, 1996)

A partir de análisis de la composición isotópica del agua de descarga de manantiales también se han desarrollado trabajos para cuantificar tiempos de tránsito del flujo en canales kársticos (Maloszewski et al. 2002) y el porcentaje de agua dulce infiltrada que contribuye en la descarga de manantiales. Otro trabajo utiliza el análisis de la composición isotópica de zonas saturadas y no saturadas del acuífero para determinar las principales zonas de almacenamiento y la forma de recarga. De esta forma Perrin et al. (2003) demuestra que en la región de Milandre, Suiza, la el

epikarst constituye la zona de mayor almacenamiento de agua y controla la dinámica de descarga, de tal forma que divide el flujo lento y el flujo rápido; cuando la recarga excede cierto umbral parte del agua pasa rápidamente a través del epikarst alimentando directamente la descarga a los manantiales. Mahler (2009) utilizó mediciones de nitrato y de $\delta^{18}O$ para cuantificar descargas rápidas del acuífero, comparando un modelo de mezcla basado en balances de masa para cada tipo de trazador; concluyó que el uso de $\delta^{18}O$ es limitado dada su variabilidad temporal en la lluvia y que el rango de valores en la lluvia se superpone al rango de valores del acuífero.

Algunos autores se han valido de mediciones de temperatura para determinar el comportamiento hidrodinámico del acuífero; Genthon et al (2005) diferenció las fuentes de recarga del acuífero de la zona de Ariege, Francia, mientras Moore et al. (2009) encontró, con base en mediciones químicas y de temperatura, flujos verticales que contribuyen con al menos el 20% de la descarga de un acuífero kárstico en Florida.

Otro tipo de análisis empleado para la cuantificación de la recarga de acuíferos son los modelos agregados, que en principio fueron desarrollados para proporcionar con aproximación suficiente las transferencias de caudal a los ríos (Sahuquillo, 1983); estos modelos proporcionan el comportamiento global del sistema acuífero utilizando pocos parámetros y pueden ser integrados con modelos de simulación de aguas subterráneas. El modelo agregado más utilizado para aguas subterráneas es el modelo unicelular que considera al acuífero como una célula en la que existe un volumen almacenado V y descarga un caudal Q a un río, donde Q y V se relacionan por la fórmula:

$$Q = \alpha V$$

Donde $\alpha$, que es el único parámetro del acuífero, tiene dimensiones de la inversa del tiempo. En general para unas condiciones iniciales $V_o$ y $Q_o = \alpha V_o$ y una recarga constante R en el tiempo distribuida de manera uniforme en el acuífero, se tiene (López-Camacho, 1981)

$$V = V_o \exp(-\alpha t) + \frac{R}{\alpha}(1 - \exp(-\alpha t))$$

$$Q = Q_o \exp(-\alpha t) + R(1 - \exp(-\alpha t))$$

Para el caso en el que se tengan períodos de recarga $R_1$, $R_2$, $R_3$, …$R_n$ y $\Delta t$ suficientemente pequeño, se tiene entonces

$$V_n = V_{n-1}\exp(-\alpha\cdot\Delta t) + \frac{R_n}{\alpha\cdot\Delta t}(1-\exp(-\alpha\cdot\Delta t)) \approx (1-\alpha\cdot\Delta t)V_{n-1} + R_n$$

$$Q_n = Q_{n-1}\exp(-\alpha\cdot\Delta t) + \frac{R_n}{\Delta t}(1-\exp(-\alpha\cdot\Delta t)) \approx (1-\alpha\cdot\Delta t)Q_{n-1} + R_n$$

Según las ecuaciones anteriores el acuífero se comporta como un embalse o depósito que tuviera como entrada $R_n$ en cada período de tiempo y cuyas salidas fueran $\alpha\Delta t V_{n-1}$. Esto representa una ventaja práctica muy interesante porque permite manejar el acuífero en lo modelos de simulación de utilización conjunta como un embalse más.

Los modelos pluricelulares englobados son una representación conceptual de la solución del problema de flujo por el método de los autovalores. Según Sahuquillo, 1983, el comportamiento del flujo de un acuífero hacia sus emergencias se puede expresar por la suma de un número de depósitos lineales. El caudal de salida en cada uno de estos depósitos o celdas virtuales $Q_i$, con recarga constante R, es:

$$Q_{it} = Q_o e^{-\alpha_i t} + b_i R\left(1 - e^{-\alpha_i t}\right)$$

Donde $\alpha_i$ = coeficiente de drenaje del depósito, $b_i$= coeficiente de reparto de la recarga entre las distintas celdas y su suma es 1. El caudal de salida total Q se obtiene como la suma de los caudales producidos por todas las celdas virtuales (NCV). El caudal $Q_i$ se relaciona con el volumen $V_i$ de agua en la celda por encima de las emergencias, mediante el coeficiente de desagüe $\alpha_i$.

$$Q = \sum_{i=1}^{NCV} Q_{it} \qquad\qquad Q_i = \alpha_i V_i$$

En el caso de recarga variable en el tiempo, en intervalos discretos de tiempo $\Delta t$, siendo $R_k$ la recarga en el período k, se tiene entonces

$$Q_{it} = b_i\left(1 - e^{-\alpha_i t}\right)\sum_{k=1}^{t} R_k e^{-\alpha_i (t-k)}$$

Vélez et al., 1997, analizaron el comportamiento del acuífero del manantial de los Santos, en Valencia, España, a partir de la modificación del modelo inicial que sugería tres celdas virtuales

aportando caudal al manantial, y agrupando las acciones sobre el acuífero en cuatro elementos, la recarga, los bombeos cercanos, bombeos intermedios y bombeos cercanos. Cada una de estas acciones tiene diferente peso sobre las diferentes celdas, siendo la suma de los efectos sobre todas las celdas igual a la magnitud total de la acción. El modelo se puede representar por la analogía hidráulica de tres embalses lineales de acuerdo al esquema de la **Figura 8**. Este nuevo esquema conceptual incluye una celda de salida adicional, conectada con las demás y tiene un volumen máximo en la celda de saldida, a partir del cual los excedentes constituyen el caudal del manantial, así cuando el volumen de esta celda es inferior al máximo los caudales en el manantial son iguales a cero.

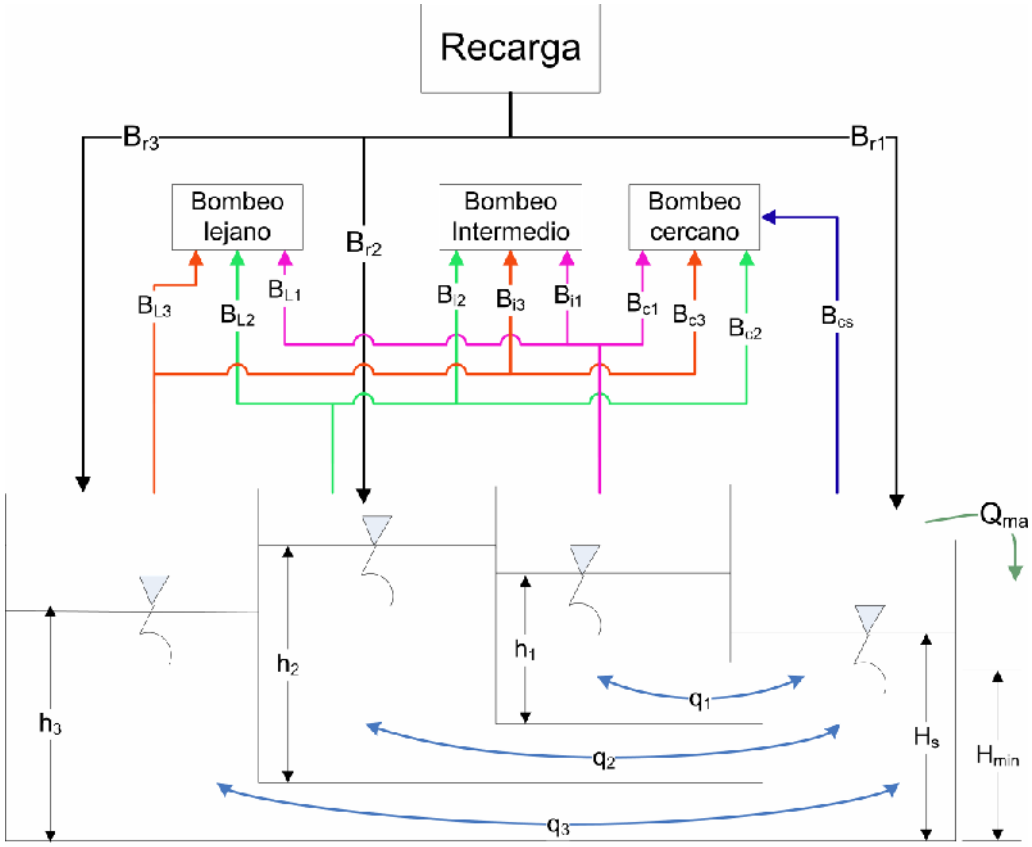


Figura 8. Esquema del modelo utilizado para la representación del acuífero del manantial de los Santos (Vélez et al., 1997)

### 2.2.2 Parámetros hidráulicos

La permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento son parámetros altamente variables debido a la estructura creada por el flujo de agua. Sin embargo es de general aceptación que existen tres permeabilidades asociadas a los acuíferos kársticos: una matriz, la red de fracturas y los canales. Worthington (2000) presenta la comparación del comportamiento del flujo de agua en cuatro acuíferos kársticos, obteniendo como resultado que más del 90% del almacenamiento está en la matriz y más del 90% del flujo se da a través de los canales, mientras la red de fracturas juega un papel intermedio para todos los casos analizados, con lo que se refuerza la teoría de que se debe contemplar el comportamiento de un acuífero kárstico como la interacción de todas la estructuras geológicas y geomorfológicas presentes. Dentro del estudio de los parámetros hidráulicos es importante tener en cuenta además el concepto dado por Kiraly (1975, 2003) sobre la escala en la determinación de la conductividad hidráulica (Figura 9); el efecto de la escala en este parámetro es discernible y se puede comprobar que los valores locales no serán los iguales a los valores regionales como consecuencia de la estructura de la red de fracturas. La conductividad hidráulica de la matriz puede ser medida en laboratorio, mientras que la producida por las fracturas debe ser medida a una escala de cientos de metros por ejemplo con pruebas de bombeo en sitios adecuados. La red de conductos opera a la escala de un cuenca completa (del orden de kilómetros). Este concepto también fue trabajado por Teutsch y Sauter (1991).

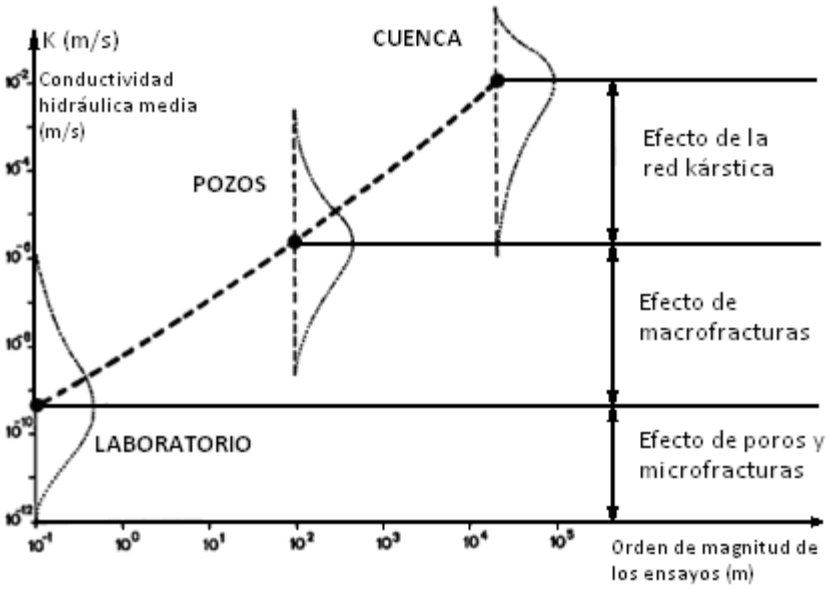

Figura 9. Efecto de la escala en la conductividad hidráulica en acuíferos karsticos (Tomado de Kiraly, 2003)

De otro lado han sido investigados diversos métodos para encontrar los parámetros hidráulicos de forma tal que a través de la comparación de datos reales y datos simulados, se obtenga la calibración de un modelo numérico. En este campo han investigado Marechal (2008), Kiraly (2003) y Fleury (2007). El método más utilizado es el modelo de tanques, que simula la interacción entre dos sistemas: la matriz porosa y los conductos, como se muestra en la Figura 10.

Esta metodología ha resultado bastante eficaz para reproducir el flujo transitorio durante una prueba de bombeo y ha permitido concluir, mediante el análisis de sensibilidad, que es la matriz el sistema que controla la respuesta a la prueba de bombeo.

Se han realizado estudios importantes también con análisis 1D para encontrar soluciones al modelo de doble porosidad, destacándose los trabajos de Cornaton y Perrochet (2002).

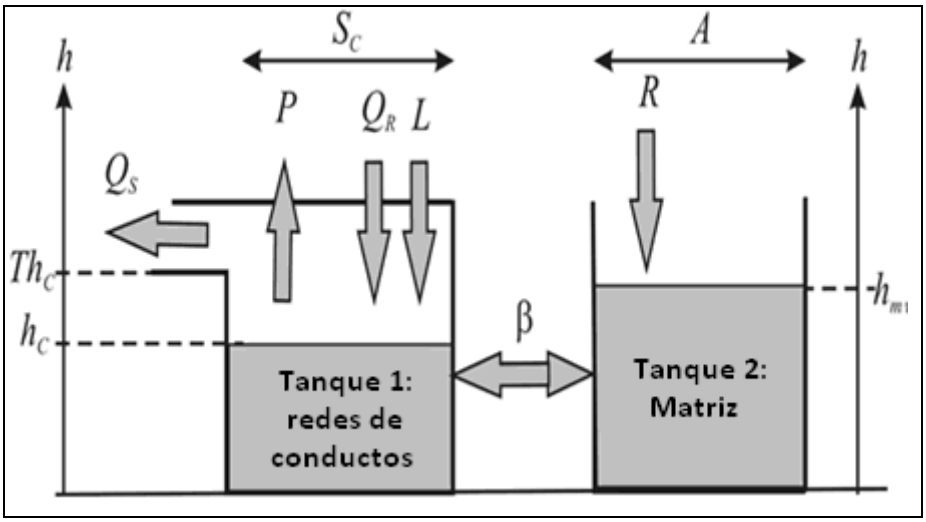


Figura 10. Modelo de tanques (Tomado de Marechal, 2008)

## 2.3 Modelo numérico

Uno de los mayores esfuerzos de la hidrogeología kárstica ha sido la modelación numérica; el problema fundamental al que se han enfrentado ha sido es la representación del variado mosaico de permeabilidades de un acuífero kárstico y su distribución espacial (White, 2002). Un método común para la implementación de un modelo numérico consiste en la definición del propósito del modelo,

luego el desarrollo del modelo conceptual usando información disponible, la escogencia de un software y el diseño del modelo (Anderson y Woessner, 1992). Sin embargo para un acuífero kárstico se tienen dos inconvenientes básicamente.

En primer lugar las características que definen un karst no siempre están presentes. Como se ha mencionado la geología y geomorfología generalmente revelan la presencia de un acuífero kárstico subyacente, sin embargo la ausencia de paisaje kárstico no descarta la presencia de éstos, como sucede con las formaciones en Bloomington, Indiana (Estados Unidos), donde el acuífero está cubierto por depósitos glaciares.(Worthington, 2009)

El segundo y más importante inconveniente está relacionado con el grado de desarrollo de los acuíferos kársticos, que implica en mayor o menor medida la presencia de conductos y cavernas de gran tamaño o la presencia de una densa red de drenaje con pequeños conductos. El mayor reto está en modelar un acuífero kárstico mediante modelos desarrollados para acuíferos de medios porosos. El código MODFLOW ha sido empleado en la modelación de acuíferos kársticos utilizando ciertas suposiciones para simular conductos. En particular su módulo SEAWAT está diseñado para simular problemas hidrogeológicos que involucran flujo subterráneo con densidad variable y transporte de solutos (Langevin et al. 2003; Cheng y Ouazar 2004). El SEAWAT ha sido aplicado mundialmente para evaluar casos tales como intrusión salina (Masterson y Garabedian 2007; Dausman y Langevin 2005; Thoma y Nelson 2008) descargas submarinas de agua subterránea (Langevin 2001; Mulligan et al. 2007; Robinson et al. 2007), almacenamiento y recuperación de acuíferos, migración de agua salada e hidrología de humedales costeros.

En el caso de la aplicación del código MODFLOW en acuíferos kársticos, Quinn et al. (2006) simuló las heterogeneidades de flujo usando conexiones de celdas tipo dren para simular los conductos. El paquete DRAIN de MODFLOW, que fue inicialmente diseñado para simular drenes de agricultura, remueve agua del acuífero a una tasa proporcional a la diferencia de nivel piezométrico y la elevación del drenaje, a lo largo de la zona donde la cabeza del acuífero sea superior a la elevación (Harbaugh et al., 2000). Como resultado se obtuvo una superficie piezométrica consistente con la dirección de flujo regional y niveles acordes con las mediciones de pozos; sin embargo las descargas en manantiales presentan diferencias grandes entre caudales medidos y simulados.

Worhtington (2009) presenta la comparación entre dos modelos numéricos que representan una parte del acuífero de Mammoth Cave en Estados Unidos. La primera simulación supone que el acuífero se comporta como un medio poroso, homogéneo e isotrópico descargando a un río en forma de infiltración. El segundo supone que existe una red tributaria de canales descargando en manantiales, simulada como líneas de alta conductividad a lo largo de los principales ejes de flujo, dados por la superficie piezómetrica o de canales explorados. La conductividad hidráulica de los canales aumenta en la dirección del flujo, representando la ampliación de los mismos.

Las superficies piezómetricas resultantes de la calibración se muestran en la Figura 11 y la comparación entre cabezas reales y simuladas en la Figura 12. Para la simulación con el modelo de medio poroso se obtiene una superficie piezómetrica suave, poco concordante con las mediciones de campo y aunque el recorrido de los trazadores simulados tiene tendencia a los manantiales se presentan errores en el destino de hasta 3.5 km. y los caudales de los manantiales son subestimados (ver Tabla 1); de otro lado con el modelo de red de canales se obtiene un superficie muy heterogénea con un perfil piezométrico convexo, similar a las mediciones de campo y todas las partículas de trazadores arrojados llegan al destino correcto. Estos resultados se refuerzan con la curva de calibración de la Figura 12, donde claramente se observa un ajuste notable del modelo de red de canales a las mediciones y presenta una disminución de la diferencia máxima de nivel del orden de 9 m entre uno y otro modelo. Además representa en un 95% los caudales de los manantiales.

La comparación entre estos dos modelos reveló cinco diferencias importantes: flujo convergente a los manantiales, canales en la superficie piezométrica, disminución del gradiente hidráulico e incremento de la conductividad hidráulica en la dirección de flujo y sustanciales efectos de escala.

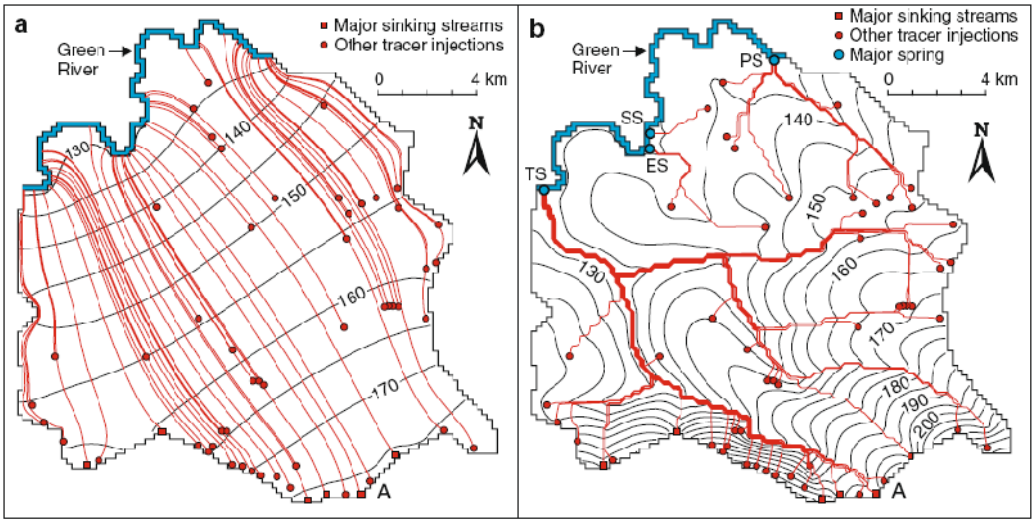


Figura 11. Superficie piezométrica y ruta de trazadores simulados suponiendo: a) medio poroso y b) red de canales (Tomado de Worthington, 2009)

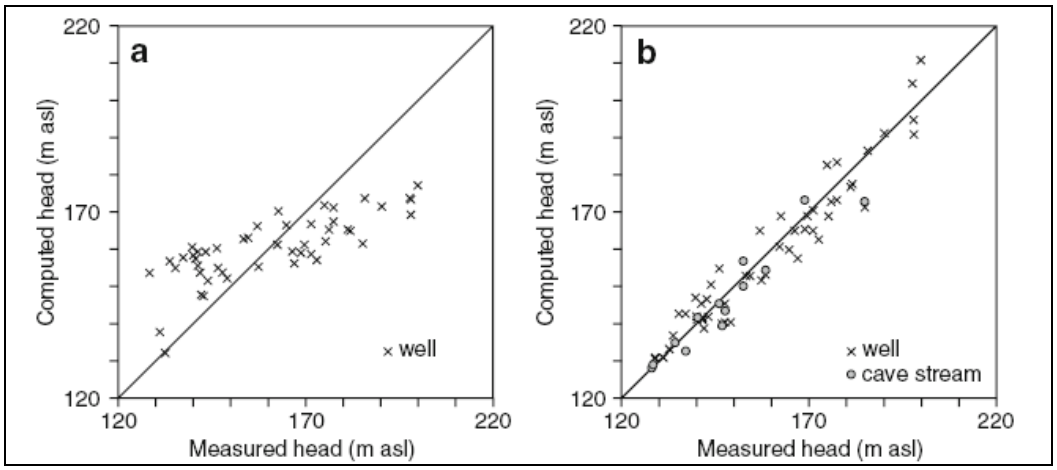


Figura 12. Relación entre cabezas piezómetricas simuladas y medidas en la calibración del modelos: a) medio poroso y b) red de canales (Tomado de Worthington, 2009)

Tabla 1. Resultados de la modelación para las simulaciones de medio poroso y de acuífero kárstico

| **Parámetro** | **Simulación medio poroso** | **Simulación con red de drenaje** |
|---|---|---|
| Conductividad hidráulica (m/s) | 1.1 E-3 | 4 E-5 a 7 |
| Error medio absoluto de nivel (48 puntos) | 12.4 m | 3.6 m |
| Caudal manantial Turnhole | 173 L/s | 4500 L/s |
| Caudal manantial Pike | 150 L/s | 836 L/s |
| Caudal manantial Echo River | 201 L/s | 359 L/s |
| Caudal manantial Styx | 96 L/s | 100 L/s |
| Porcentaje del caudal total de 4 manantiales | 10 % | 95 % |
| Error medio en el destino de trazadores | 3.97 km | 0 km |

# 3. Hidrología

## 3.1 Introducción

En este capítulo se presentan las principales conclusiones de la cuantificación de la dinámica hidrológica y metereológica de la isla de San Andrés a escalas de tiempo intra-anual, anual e interanual, de la estimación de la recarga obtenida en el estudio "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático", usando la metodología propuesta por Bradbury et al. (2000) y adaptada por la Vélez et al. (2005), y del análisis para la identificación de señales de cambio climático.

En el análisis de la hidrología se utilizaron series mensuales de lluvia, temperatura y velocidad de viento con el fin de discernir posibles escenarios de cambio climático que afectarían la isla y su relación con la recarga del acuífero, parámetro altamente sensible durante la calibración del modelo numérico. Se tuvieron en cuenta además los efectos del ENSO (El Niño Southern Oscillation) estimados a partir del índice MEI (Multivariate ENSO Index), un promedio ponderado de las principales características del fenómeno ENSO, representadas en las siguientes seis variables: presión a nivel de mar, componentes zonal y meridional de viento, temperatura superficial del mar, temperatura del aire en superficie y porcentaje de nubosidad. El ENSO es, a grandes rasgos, un fenómeno macroclimático caracterizado por el aumento de las temperaturas superficiales del océano Pacífico tropical y la variación de las presiones atmosféricas en los extremos oriental y occidental del mismo. Dicho fenómeno tiene repercusiones directas en el comportamiento climático a nivel global por lo que el análisis de su influencia en la hidrología local se hace indispensable.

Además del ENSO, se analizaron fenómenos como NAO (North Atlantic Oscillation), AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) y el comportamiento de las temperaturas superficiales del Océano Atlántico Norte, que tienen gran influencia en el clima del mar Caribe.

Para la identificación de señales de cambio climático se tomaron series diarias de precipitación y temperatura, para la aplicación de dos metodologías. La primera está relacionada con la identificación de la estructura de la lluvia en términos de frecuencia e intensidad y los cambios que ha sufrido, tanto para los años normales como para los años con ocurrencia del fenómeno ENSO. Una segunda metodología consiste en cuantificar la relación existente entre la temperatura y los eventos extremos de lluvia a partir de la relación Clausius – Clapeyron y analizar los posibles cambios presentados.

## 3.2 Información hidrometeorológica

En la Tabla 2 se presenta información general de las estaciones hidrometeorológicas empleadas en el análisis hidrológico

Tabla 2. Información de estaciones operadas por el IDEAM en la Isla de San Andrés, Colombia

| Código | Latitud | Longitud | Nombre | Fecha inicio | Lugar | Tipo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1701001 | 12.55 | -81.70 | Empoislas | 15/04/1973 | San Andrés | Pluviográfica |
| 1701002 | 12.48 | -81.72 | Hoyo Soplador | 15/04/1986 | San Andrés | Pluviométrica |
| 1701502 | 12.58 | -81.72 | Aeropuerto | 15/01/1958 | San Andrés | Pluviográfica |
| 80001 | 12.58 | -81.72 | Aeropuerto | 01/06/1957 | San Andrés | Radiosonda |

## 3.3 Ciclo anual de precipitación

A partir de las series de precipitación de las estaciones Sesquicentenario (Aeropuerto), Empoislas y Hoyo Soplador se obtuvieron los ciclos anuales de lluvia, así como sus relaciones con fenómenos macroclimáticos como el ENSO (El Niño-Oscilación del Sur), NAO (Oscilación del Atlántico Norte) y la variación de temperatura del Atlántico Tropical Norte. Igualmente en el desarrollo del proyecto base de esta tesis se realizaron análisis de homogeneidad que son presentados en el anexo del informe final del mismo y serán omitidos en el presente documento. En la Tabla 3 se presenta la información principal de las estaciones de precipitación utilizadas.

Tabla 3. Información de las estaciones de precipitación

| Estación | Tipo de dato | Año inicio | Año fin | Longitud de registro (años) | % datos faltantes |
|---|---|---|---|---|---|
| Sesquicentenario | Diario | 1969 | 2008 | 39 | 8% |
| Empoislas | Diario | 1974 | 2008 | 34 | 17% |
| Hoyo Soplador | Diario | 1986 | 2008 | 22 | 15% |

En la Figura 13 se muestra en ciclo anual para la isla de San Andrés así como las anomalías respecto al promedio anual, es decir estandarizando la serie con la media anual. Del análisis se concluye que las lluvias exhiben un ciclo unimodal en el que se presentan una temporada de déficit de lluvias entre los meses de diciembre y mayo y una temporada de exceso de lluvias entre los meses de junio y noviembre. El mes más lluvioso es octubre con un promedio de 338 ± 25 mm. y el más seco es marzo con un promedio de 22 ± 3 mm.

En promedio la precipitación en la isla es de 1973 ± 70 mm., con un periodo lluvioso entre los meses de junio y noviembre (1509 ± 54 mm. de lluvia acumulada), con un periodo de lluvias menores entre los meses de enero y abril (168 ± 10 mm. de lluvia acumulada) y dos meses de transición (mayo y diciembre). Los valores de las anomalías estandarizadas de las lluvias mensuales se muestran en la Figura 14. Allí se puede corroborar la existencia de un período seco definido, entre los meses de enero y abril, un período lluvioso entre los meses de junio y noviembre, y períodos de transición en los meses de mayo y diciembre.

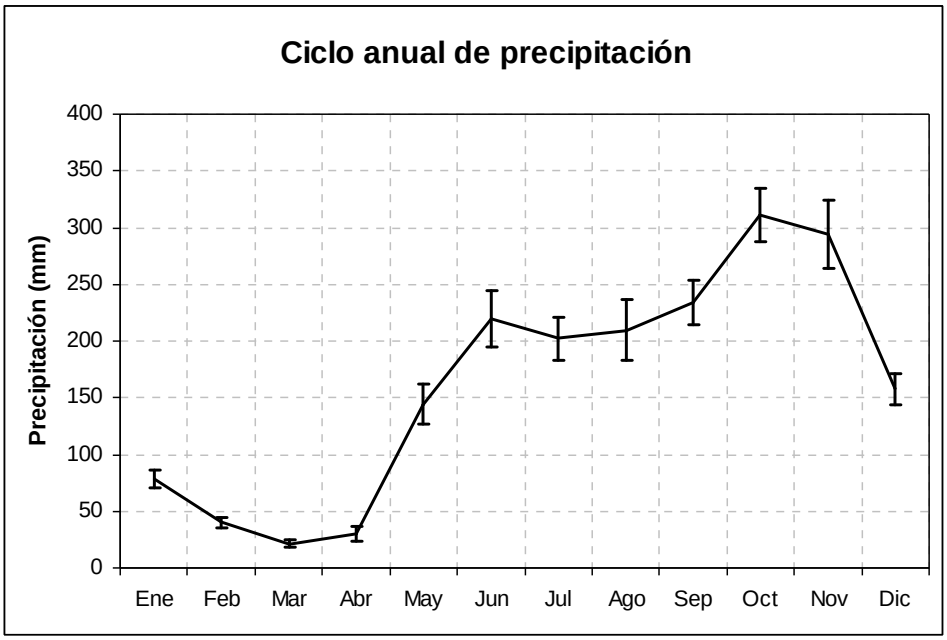


Figura 13. Ciclo anual de lluvias

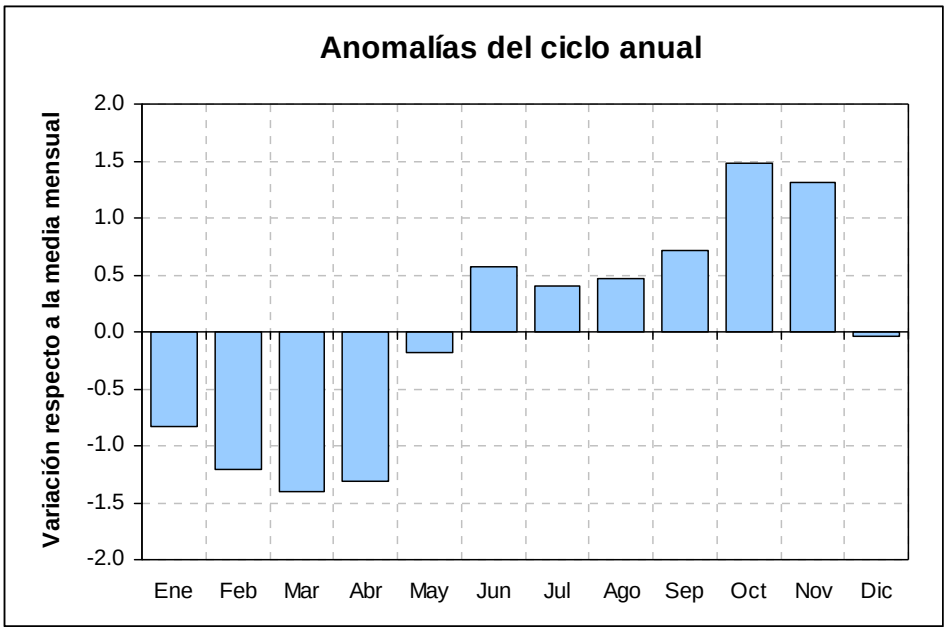


Figura 14. Anomalías mensuales del ciclo anual

### 3.3.1 Variabilidad interanual de la precipitación. Relación con el macro-clima.

#### 3.3.1.1 ENSO

Para estudiar la dinámica interanual de la precipitación se cuantificará su grado de asociación con diversos fenómenos macro-climáticos, incluyendo el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) en sus dos fases extremas El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría), así como la variación de las temperaturas superficiales del Atlántico Tropical Norte (ATN-SST).

Para realizar estos análisis, se obtuvo información de las variables macro-climáticas de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), como se muestran en la Tabla 3.

Tabla 4. Datos de las variables macroclimáticas empleadas (Fuente: NOAA)

| Fenómeno | Variable |
|---|---|
| ENSO | MEI (Multivariate ENSO Index) |
| TNA | TNAI (Tropical North Atlantic Index) |

En la Figura 15 se presenta el ciclo anual de las lluvias promedio en la isla durante las fases del ENSO (El Niño y La Niña), así como durante las épocas normales. Para definir los años y meses de El Niño y La Niña se ha usado la clasificación de la NOAA de Estados Unidos, cuyos resultados se consignan en la siguiente página web: http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/enso.current.html#indices.

Nótese que en la Figura 15 se presenta el año “hidrológico” entre Junio (año 0) y Mayo (año +1), ya que temporada define la dinámica del ENSO sobre el Océano Pacífico tropical (Poveda, 2000, Poveda et al., 2006), y por tanto sus efectos sobre la hidroclimatología del Caribe (Poveda & Mesa, 1997). Los resultados indican que, en general, las lluvias mensuales del periodo Agosto-noviembre (excepto Octubre) son mayores durante El Niño que durante La Niña, mientras que las lluvias del periodo diciembre (año 0) - mayo (año +1) son mayores durante La Niña que durante El Niño.

En la Figura 16 se presentan los valores de las diferencia de precipitación durante el promedio de los años El Niño y La Niña respecto al año promedio normal. Se observa que durante los años El Niño se presentan anomalías negativas importantes (del orden de 50 mm.) de lluvia en los meses de

diciembre (año 0) a julio (año +1), y anomalías positivas en los meses de agosto y noviembre (año 0). Por otra parte, durante los años La Niña se presentan fuertes anomalías variaciones (del orden de 45 mm. por mes) en el mes de octubre, con aumento de lluvias, y déficit importante de lluvias para el mes de junio (50 mm. aproximadamente). Se resalta el hecho de que se presente alternancia en exceso y déficit de lluvia para los meses de octubre y noviembre con la ocurrencia de las dos fases del fenómeno ENSO.

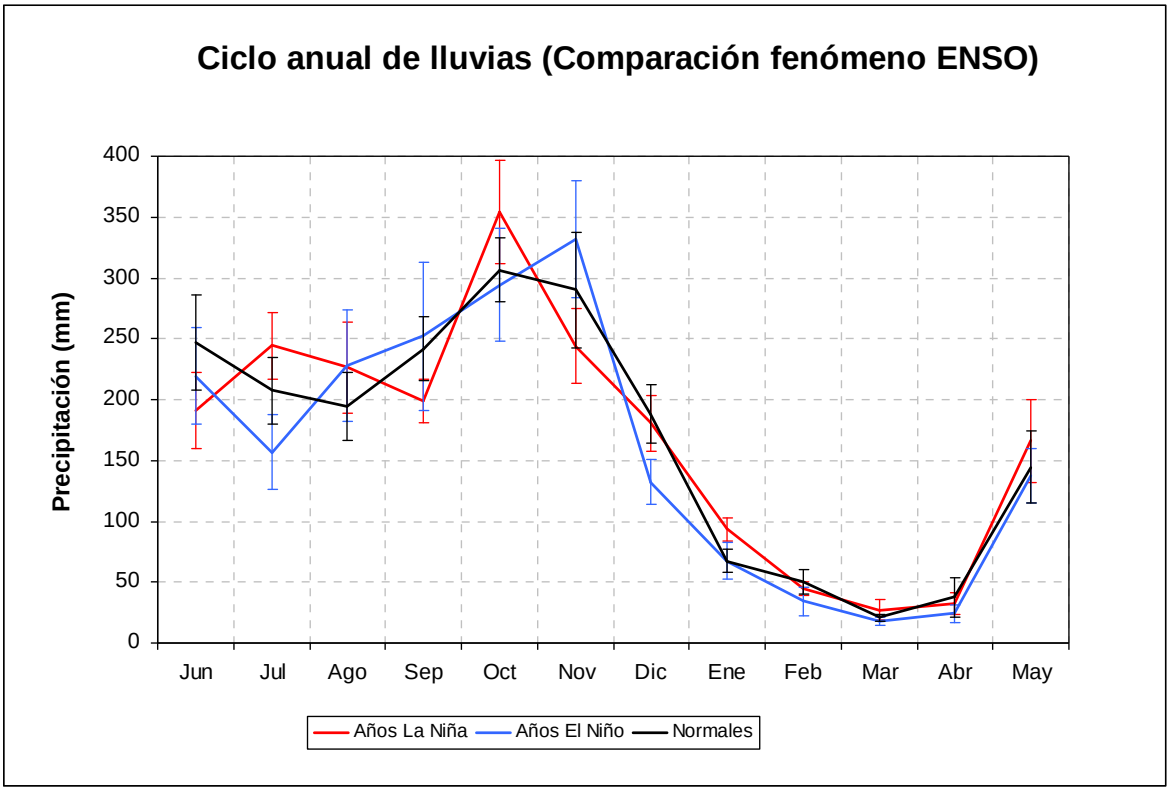


Figura 15. Ciclo anual promedio de las lluvias durante las fases extremas del ENSO (El Niño y La Niña), así como durante épocas normales.

Adicionalmente la Figura 17 muestra la relación entre las precipitaciones durante la ocurrencia de las fases del fenómeno ENSO, definida como P_LaNiña/P_ElNiño, y se concluye que en general durante los años La Niña llueve más respecto a los años El Niño, para la temporada de diciembre a mayo y durante los meses de julio y octubre, presentándose la mayor diferencia durante el mes de julio con más de 50% de precipitación adicional. Sin embargo para los meses de junio, agosto, septiembre y noviembre las lluvias son menores para años La Niña respecto a años El Niño, en especial durante el mes de noviembre.

Finalmente, a partir de los análisis anteriores, se puede concluir que el fenómeno ENSO afecta notoriamente el comportamiento de las precipitaciones, de tal forma que se presentan en general o predominan déficits de lluvia durante la fase El Niño y excesos de lluvias durante la fase La Niña. Estas anomalías representan condiciones diferentes de recarga para el acuífero, debido a una menor o mayor disponibilidad de agua para el proceso de infiltración y percolación; debido a esto las estimaciones de recarga del acuífero deberán hacerse tomando series de precipitación tanto para años normales como para años El Niño y años La Niña.

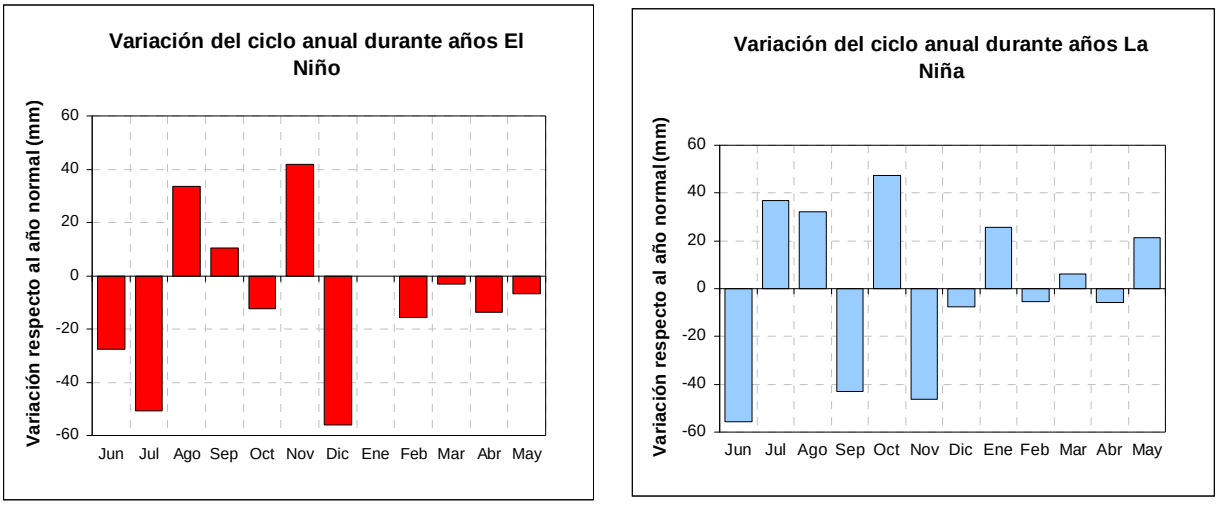


Figura 16. Ciclo anual promedio de las anomalías de las lluvias en los años de ocurrencia de El Niño (izquierda), y La Niña (derecha).

Respecto a la influencia del fenómeno ATN-SST, en la Figura 18 se muestran las variaciones en el ciclo anual de lluvias ante la ocurrencia de las fases cálida y fría; en general para los meses de abril y noviembre se presentan variaciones positivas de más del 90% durante la fase cálida de este fenómeno, y en menor medida, aunque no despreciable, en los meses de marzo, julio y diciembre se presentan variaciones positivas del orden del 40%. Para la fase fría hay un aumento de lluvias en los meses de marzo, julio y octubre, mientras en junio se da una disminución considerable de lluvia. Cabe resaltar el hecho que para los dos meses más lluviosos del año (octubre y noviembre) se presente alternancia en el aumento considerable de lluvia con las fases de este fenómeno.

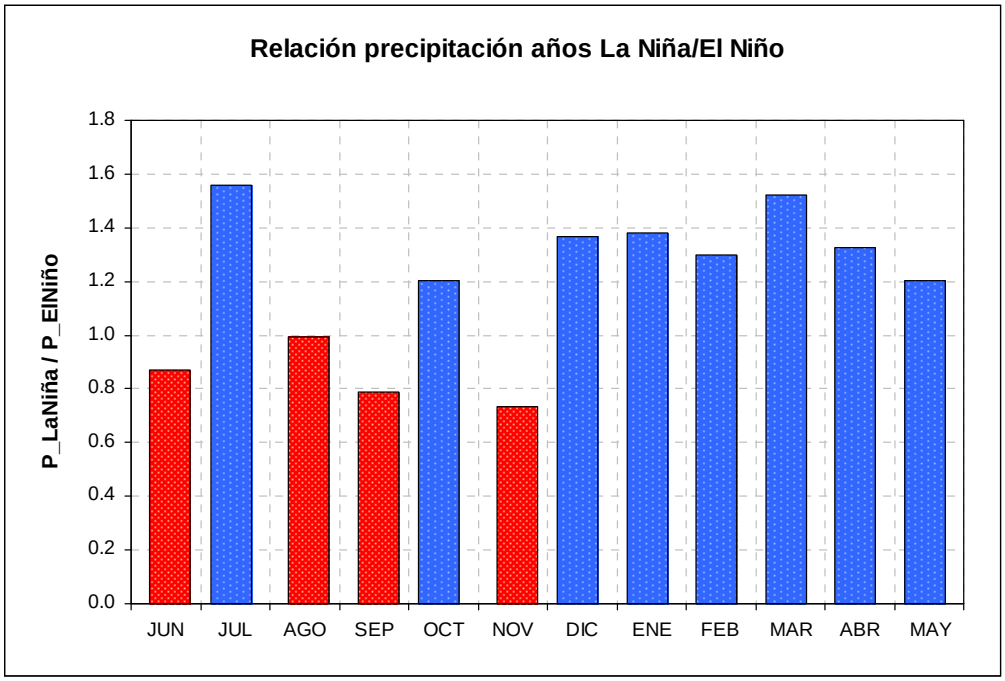


Figura 17. Relación de la precipitación durante años La Niña y años El Niño definida como P_LaNiña/P_ElNiño (en rojo relaciones mayores de 1 y en rojo relaciones menores de 1)

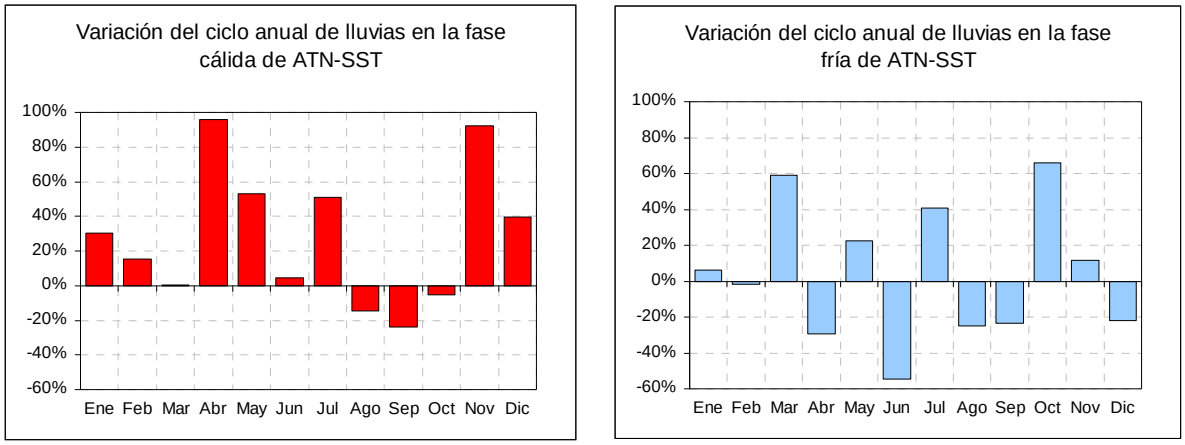


Figura 18. Variación del ciclo anual de lluvias en la fase cálida del fenómeno ATN-SST (derecha) y en la fase fría del fenómeno ATN-SST (izquierda)

## 3.4 Ciclo anual de temperatura

Para el análisis del comportamiento de la temperatura se utilizaron las series de temperatura obtenidas de la radiosonda lanzada desde el aeropuerto Sesquicentenario de la isla de San Andrés, cuya información puede ser obtenida a través del sitio web http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/igra/index.php. Dicha información contiene datos de temperatura promedio mensual a distintos niveles atmosféricos. En la se muestran los datos principales de la estación de radiosonda

Tabla 5. Datos de la estación de radiosonda del aeropuerto Sesquicentenario

| **Estación** | **Tipo de dato** | **Año inicio** | **Año fin** | **Tiempo de registro** | **Datos faltantes** |
|---|---|---|---|---|---|
| Radiosonda | Promedio mensual | 1958 | 2008 | 51 años | 19% |

El ciclo anual de temperatura no presenta variaciones importantes a lo largo del año ya que se trata de una zona tropical. En general durante el período de lluvias (junio-noviembre) se presentan las máximas temperaturas oscilando alrededor de los 27° C, mientras que para el período seco la temperatura disminuye del orden de 1.5° C. El fenómeno macroclimático más influyente en la variación de la temperatura es el ENSO; en la fase fría las temperaturas típicamente disminuyen alrededor de 0.5° C, como se muestra en la Figura 19.

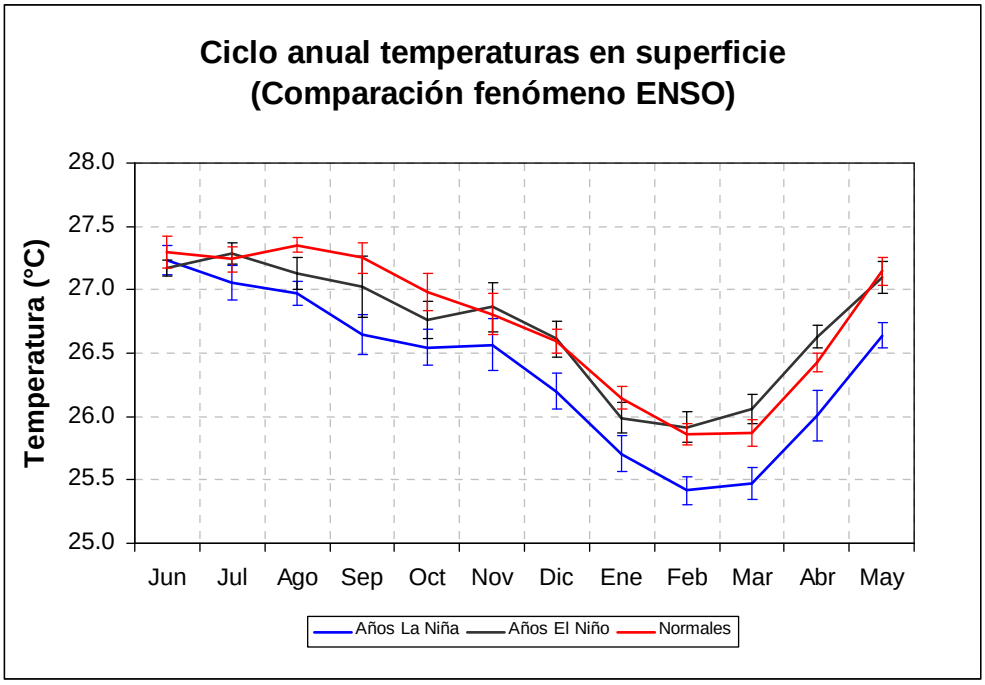


Figura 19. Influencia del fenómeno ENSO en el ciclo anual de temperatura

## 3.5 Ciclo anual de la velocidad de viento zonal

El análisis se hace a partir de datos de radiosonda obtenidos en el sitio web http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/igra/index.php, que contienen los promedios mensuales de la velocidad de viento a diferentes niveles atmosféricos. Para la construcción de los perfiles verticales de la velocidad horizontal de viento se tomaron únicamente los primeros nueve niveles atmosféricos, desde superficie hasta los 200 hPa.

El ciclo anual de velocidad promedio del viento zonal para años sin la ocurrencia del fenómeno ENSO se muestra en las Figura 20 y Figura 21. En esta gráfica se aprecia claramente la evolución de una corriente de vientos proveniente del este ubicada alrededor de los 900 hPa y que tiene sus picos de actividad en los trimestres de Junio-Julio-Agosto (JJA) y Diciembre-Enero-Febrero (DEF); dicha corriente es conocida como el chorro de San Andrés (Poveda y Mesa, 1999; Amador et al., 2000). Cabe anotar la convención de signos para el viento zonal, donde el signo positivo indica vientos en dirección este-oeste y el signo negativo vientos en dirección oeste-este. Esta corriente de chorro presenta en promedio velocidades máximas del orden de 10 m/s durante el trimestre JJA y mínimas durante el trimestre SON del orden de 5 m/s.

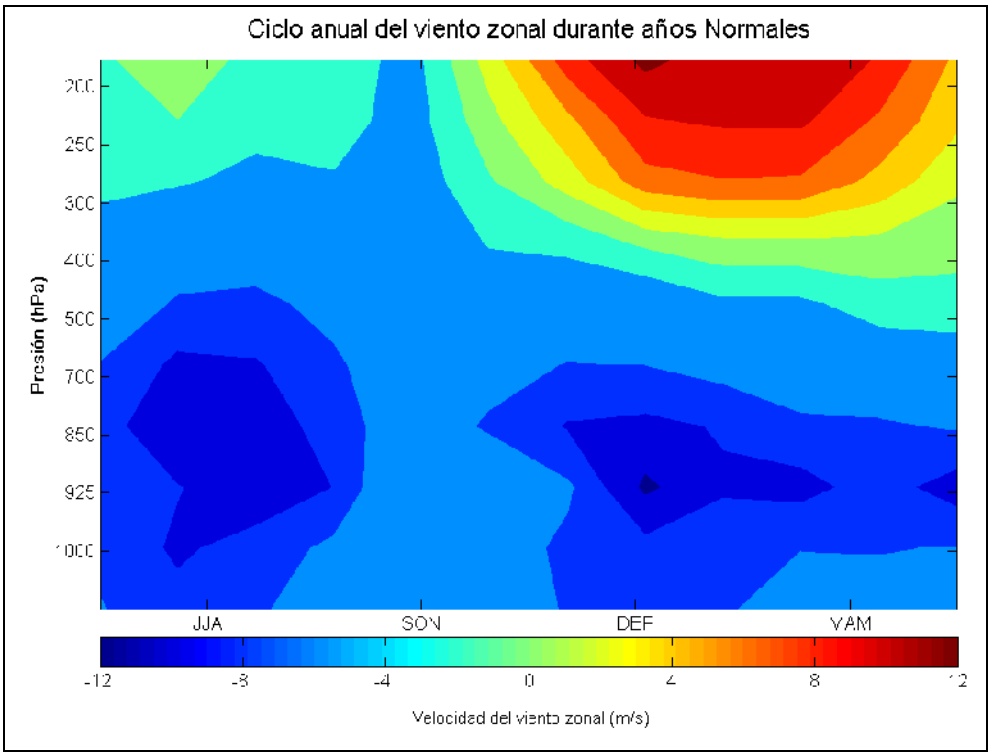


Figura 20.Ciclo anual de la velocidad del viento (m/s) a diferentes alturas asociadas con diferentes niveles de la presión atmosférica, expresados en hPa.

### 3.5.1 Variabilidad interanual de la velocidad del viento. Relación con el macro-clima.

En las Figura 22 y Figura 23 se muestra el comportamiento del perfil de vientos para distintos niveles de la atmósfera durante los años El Niño y la Niña. Se observa que para años El Niño la velocidad promedio aumenta fuertemente para el trimestre JJA, mientras durante el resto del año el chorro superficial de debilita.

Durante los años La Niña la velocidad zonal disminuye de manera importante en las capas más bajas de la atmósfera para todos los trimestres especialmente en JJA (del orden de 20%, con respecto a años normales) y para una altura alrededor de los 925 hPa aumenta en el trimestre DEF alrededor de un 10% con respecto a años normales. La Figura 24 presenta la variación de los anteriores perfiles respecto a un año considerado normal, y se aprecia claramente la incidencia del fenómeno ENSO en la velocidad de viento, con variaciones del orden del 20%.

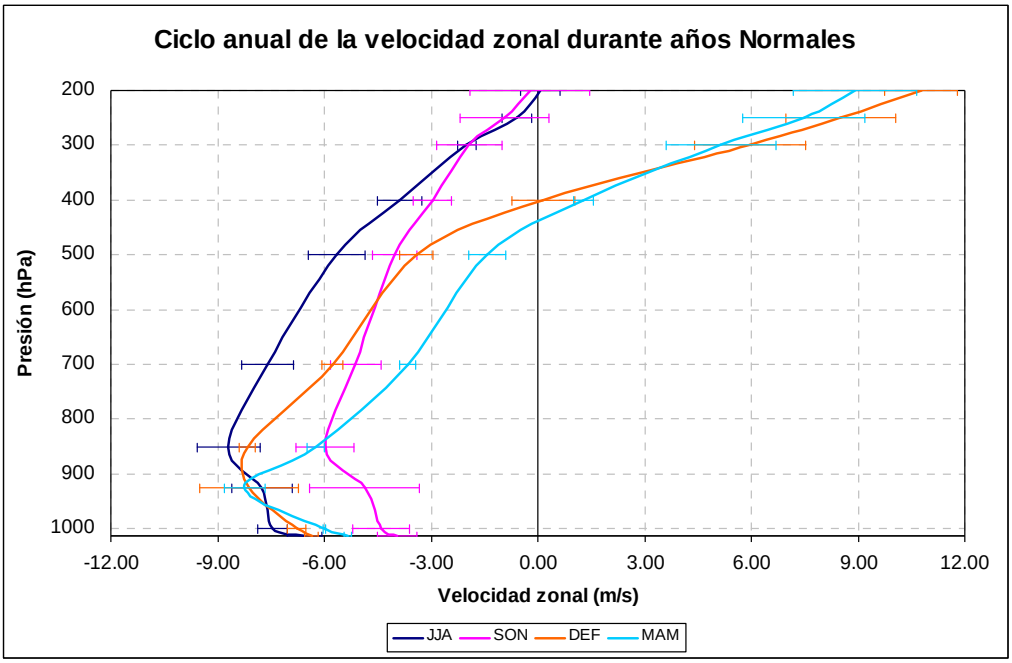


Figura 21. Perfil del ciclo anual de la velocidad del viento (m/s) a diferentes alturas asociadas con diferentes niveles de la presión atmosférica, expresados en hPa

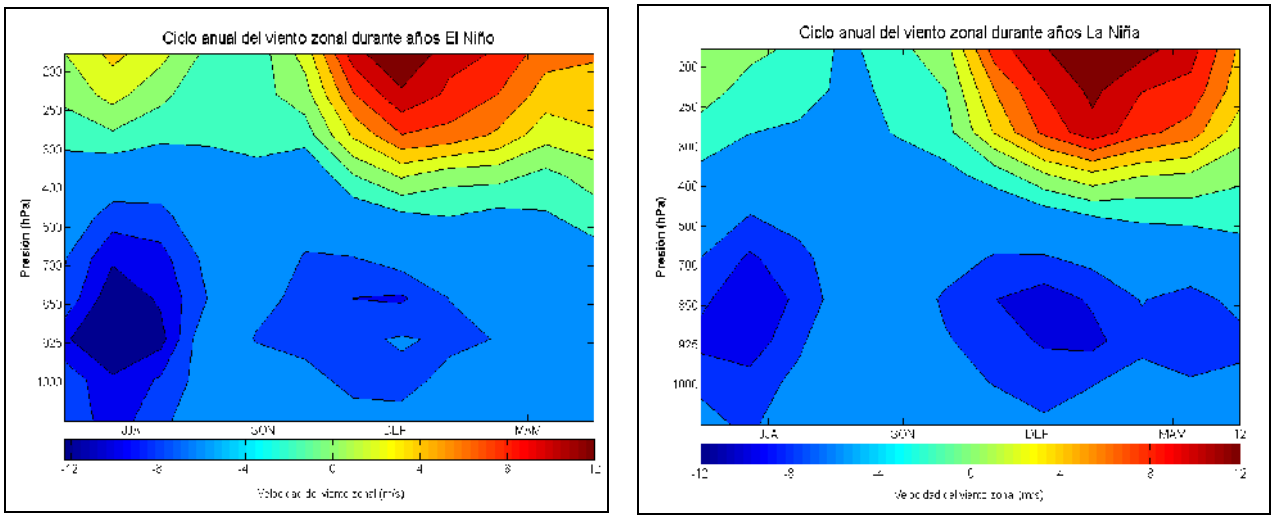


Figura 22. Ciclo anual de velocidad del viento zonal a distintos niveles de la atmósfera durante las dos fases del ENSO. (Izquierda) El Niño, (derecha) La Niña.

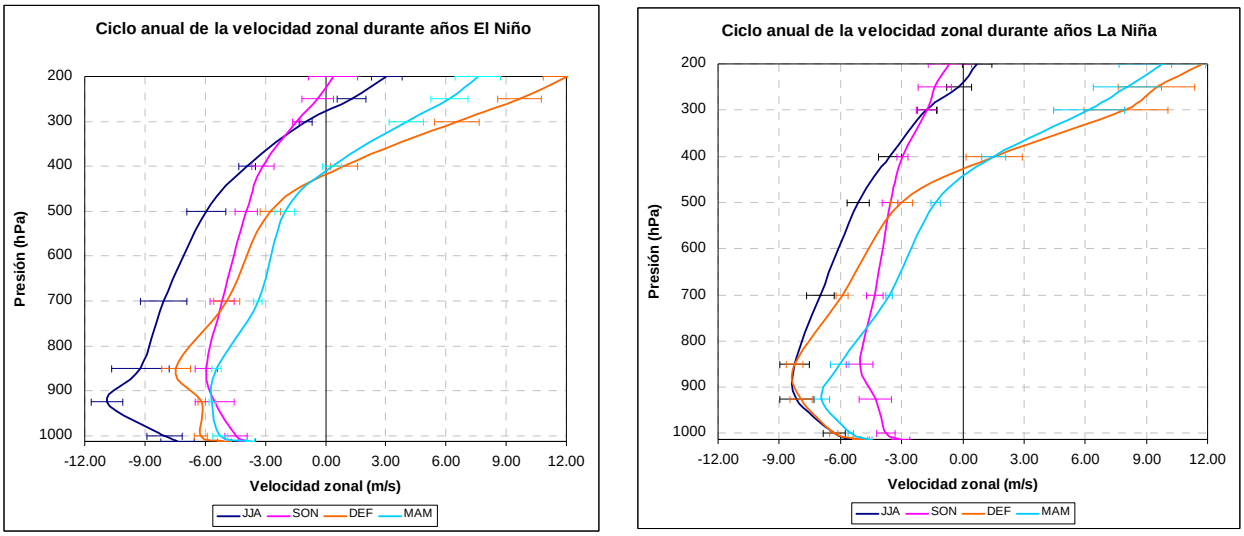


Figura 23. Ciclo anual de velocidad del viento zonal a distintos niveles de la atmósfera durante las dos fases del ENSO. (Izquierda) El Niño, (derecha) La Niña.

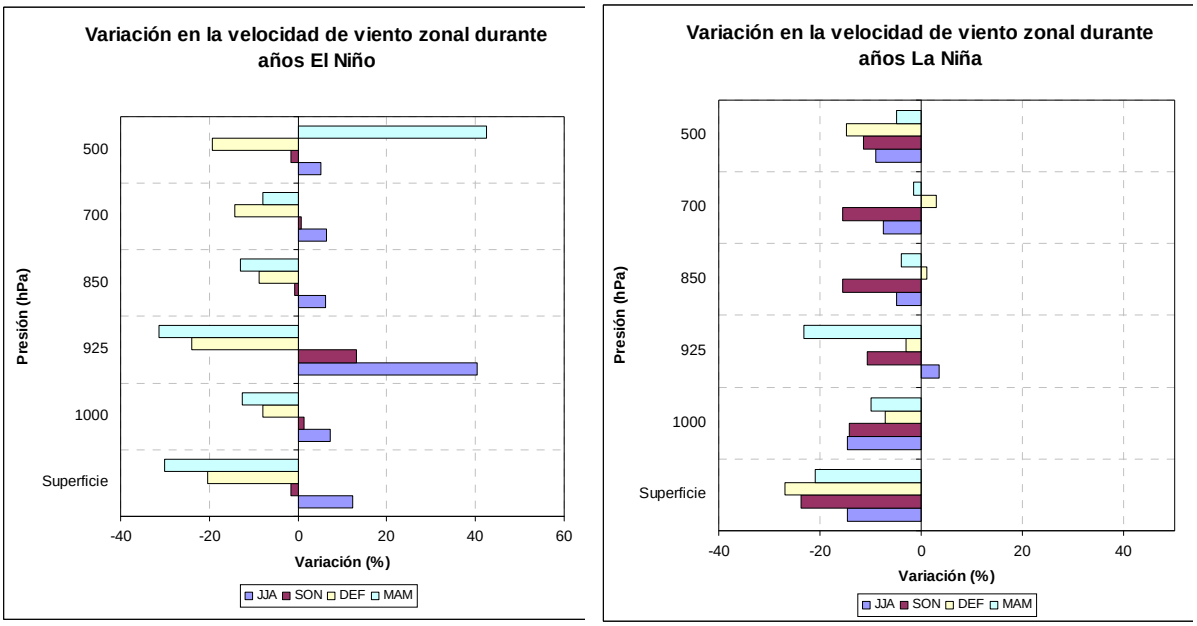


Figura 24. Cuantificación de la variación del ciclo anual de velocidad zonal durante años El Niño (derecha) y durante años La Niña (izquierda)

## 3.6 Evapotranspiración

La evapotranspiración es una componente fundamental del balance hídrico. Para la estimación de la evapotranspiración en la isla se dispone de información relacionada con temperatura media mensual y precipitación diaria, lo cual permite utilizar los métodos de Turc (1961), Budyko (1971), Coutagne (1954) y Choudhury (1999) para estimar la evapotranspiración real y el método de Thornthwaite (1957) para estimar la evapotranspiración potencial.

En la Figura 25 se presentan los resultados de la evapotranspiración real. Cabe anotar que los métodos de Choudhury y Budyko tienen una base teórica similar y por tanto no es de sorprender que sus resultados sean muy similares, pero el método de Turc, que utiliza variables diferentes a éstos dos, también presenta valores muy similares tanto en magnitud como en forma, por lo cual podríamos afirmar que la evapotranspiración real anual promedio es del orden de 1200 mm/año. El método de Coutagne presenta valores un poco más bajos.

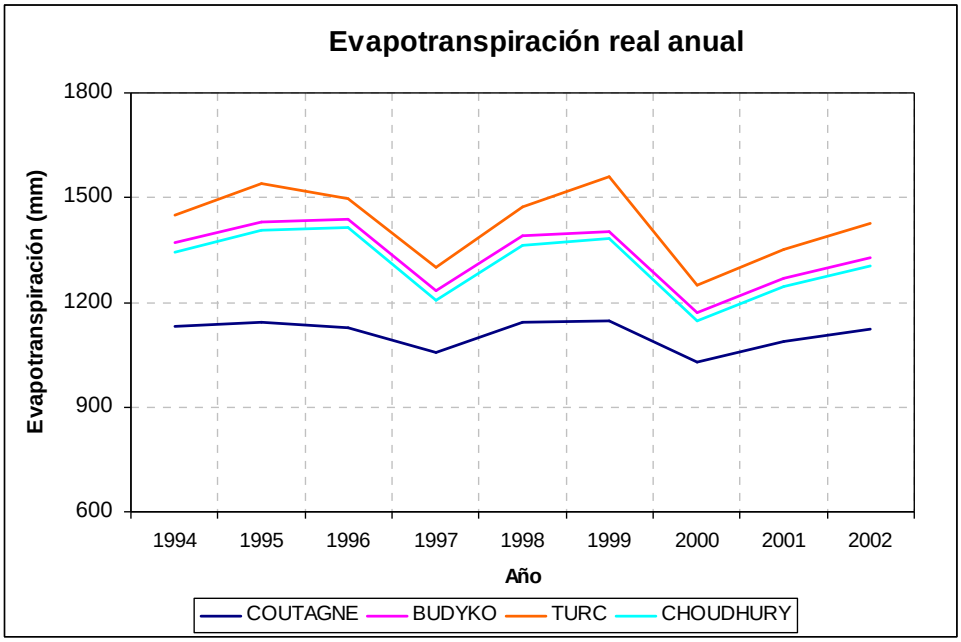


Figura 25. Estimativos de la evapotranspiración real anual (mm) para el período 1997-2008

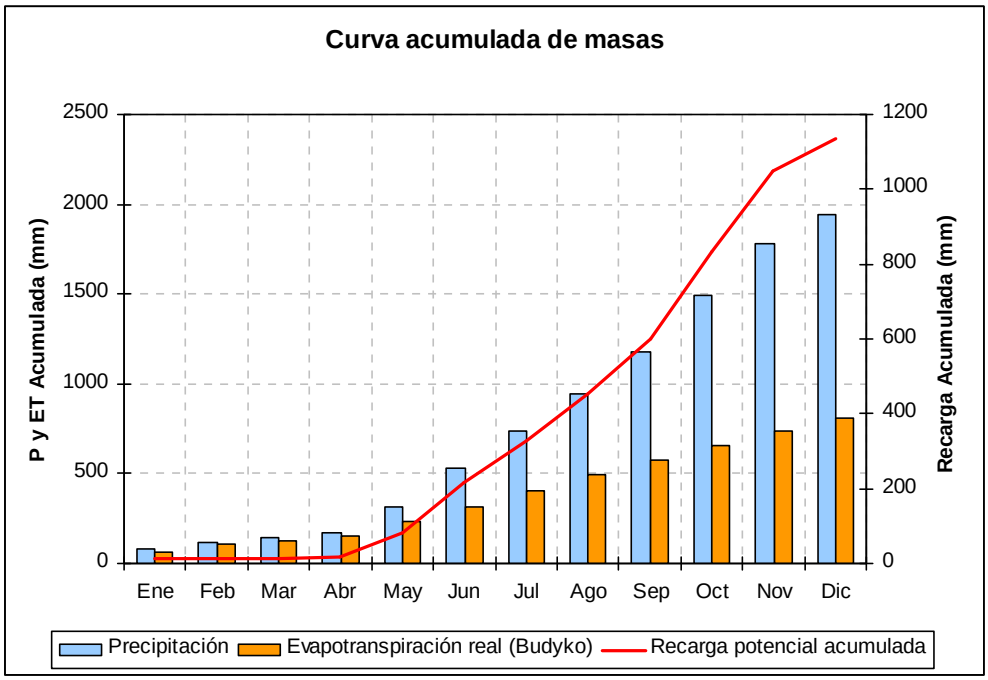


Figura 26. Curvas de precipitación y evapotranspiración acumuladas

Para verificar el periodo durante el cual la precipitación es mayor que la evapotranspiración, es decir los meses cuando se produce recarga del acuífero se construyeron las curvas de masas acumuladas de precipitación y evaporación durante el ciclo anual (Figura 26). Allí se observa que el período de recarga más significativo está comprendido entre los meses de junio a noviembre, correspondiente a la temporada de mayores lluvias, donde la precipitación siempre es mayor que la evapotranspiración.

## 3.7 Estimación de la recarga

La estimación de la variación espacial y temporal de la recarga es un factor fundamental para la modelación de acuíferos. Diferentes trabajos e investigaciones sobre los acuíferos de la Isla han reportado los valores de estimados y se presentan en la Tabla 6, observando que la mayoría se centran sobre la zona del Cove, definida como la principal zona de recarga.

Tabla 6. Valores de recarga estimados en trabajos anteriores

| **Autor** | **Zona** | **Recarga (mm/año)** |
|---|---|---|
| Lemoine, 1987 | Infiltración máxima promedio Cove (mm/año) | 924 |
| | Infiltración directa Cove (mm/año) | 416 |
| Huggeth, 1989 | Recarga Cove (mm/año) | 342 |
| Bonilla, 1992 | Recarga Cove (mm/año) | 416 |
| Ángel, 1993 | Recarga Potencial Total Cove (mm/año) | 691 |
| | Recarga Real Total Cove (mm/año) | 608 |
| | Recarga Localizada (mm/año) | 5625 |
| | Área de recarga localizada (km2) | 0.002 |
| Vargas et al, 1997 | Recarga Potencial Acf. San Luís (mm/año) | 661 a 686 |
| | Recarga Potencial Natural Acf San Luís Urbanizado (mm/año) | 132.2 a 137 |
| | Recarga Artificial Acf San Luís Urbanizado (mm/año) | 109 |
| | Recarga Potencial Acf San Andrés (mm/año) | 520 |
| | Recarga Potencial Cove (mm/año) | 373 a 500 |
| IGAC, 1998 | Infiltración efectiva general en Acuífero San Andrés | 398 |

En el proyecto “Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático” se utilizó un modelo numérico desarrollado por Bradbury et al (2000)., y probado con resultados satisfactorios en Pheasant Branch Creek, una zona húmeda ubicada al sur de Wisconsin, Estados Unidos e implementado para Colombia por Vélez et al. (2005). Para la implementación del modelo se hizo uso del Sistema de Información Geográfica de la Hidro-climatología de Colombia, denominado HidroSIG. Se usaron además los mapas de tipo y uso del suelo para la estimación de la recarga del IGAC (1997). El análisis presentado en estudios anteriores permitieron definir la principal zona de recarga en la isla delimitada por las cuencas donde se desarrollan con mayor intensidad los fenómenos de infiltración (Figura 27).

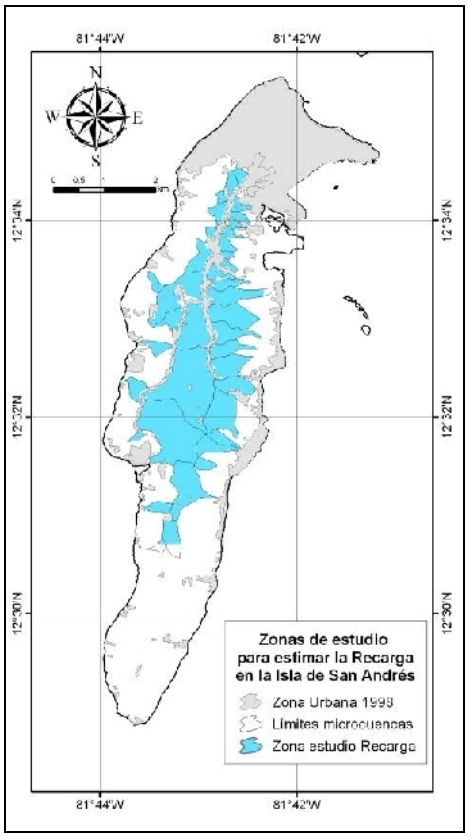


Figura 27. Área de estudio para la estimación de la recarga en la Isla de San Andrés (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático")

A grandes rasgos dicho modelo se fundamenta en la aplicación de la ecuación de balance hídrico en cada una de las celdas (5 x 5 m, en este caso) de la representación digital del área de estudio. Cada una de las celdas contiene información de variables hidrometeorológicas, físicas y de las características del terreno. Para cada celda del modelo numérico, los elementos que intervienen en el balance, se muestran esquemáticamente en la Figura 28, donde P es la precipitación, EVP es la evapotranspiración real y ESD es la escorrentía superficial de otras celdas; todas las variables en mm/día. El modelo tiene en cuenta además la capacidad máxima de almacenamiento dada por la textura y la cobertura del suelo y la capacidad de infiltración del agua dada la humedad antecedente del suelo, la textura y la cobertura. Con el modelo se obtiene un mapa que representa la distribución espacial de la recarga potencial anual en el área de estudio.

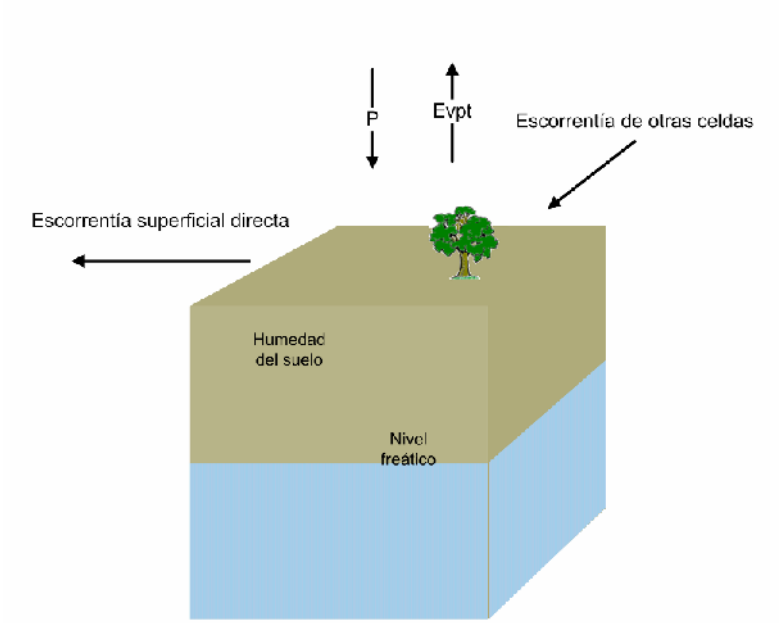


Figura 28. Elementos y variables presentes en el balance hídrico celda a celda (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático")

La recarga potencial anual se estimó para tres eventos típicos: condición promedio (2006-2007 año Normal), fase fría del ENSO (2007-2008 año La Niña) y fase cálida del ENSO (1991-1992, año El Niño). Cada año de estudio elegido se inició en noviembre, después de las lluvias de Octubre cuando se supone el suelo completamente saturado (la humedad del suelo es igual a su capacidad máxima de almacenamiento). Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Recarga promedio para un año seco, húmedo y normal

| Tipo Año | Fecha | R (mm/año) | Prec. (m/año) | R/P (%) |
|---|---|---|---|---|
| Seco | nov1991-nov1992 | 255 | 1503 | 15 |
| Normal | nov2006-nov2007 | 498 | 1918 | 26 |
| Húmedo | nov2007-nov2008 | 810 | 2462 | 33 |

Se evidencia que se pueden presentar fuertes diferencias entre la recarga potencial estimada para años normales y los años de ocurrencia del ENSO. Los rangos de porcentaje de recarga respecto a la precipitación promedio para cada año varían entre 15 y 33%, presentándose una recarga aproximada a los 810 mm./año para un año húmedo, de 480 mm/año para un año promedio y de 225 mm/año para un años seco.

## 3.8 Identificación de señales de cambio climático

### 3.8.1 Introducción

Los modelos de predicción de cambio climático, en relación con los eventos extremos de precipitación, han arrojado resultados que apuntan a aumentos importantes en la intensidad de la lluvia (Meehl et al., 2000b); de hecho, modelos globales y estudios regionales han demostrado que el cambio en la intensidad de los eventos extremos es mucho más importante que el cambio en la media de la cantidad de precipitación (Pall et al., 2006).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) celebrado en 2002 reconoció la precipitación como variable climática clave en el discernimiento del impacto del calentamiento global, y el entendimiento de la distribución de la lluvia como la herramienta más importante en el estudio de eventos extremos. Sin embargo en el mismo sentido, el Tercer Reporte del IPCC reconoce como una debilidad la deficiencia en la disponibilidad, calidad y resolución de los datos de precipitación, parámetros influyentes en el estudio de eventos extremos; los registros de lluvia sufren de heterogeneidad espacio-temporal, cambios en la instrumentación, falta de digitalización y barreras políticas para la adquisición de los datos (Groisman and Legates, 1994); además el periodo de medición satelital que inició en la década de 1970, brindando mayor cobertura, no posee suficiente longitud de registro para asociar cambios en la distribución de la lluvia a fenómenos diferentes a la variabilidad de escala decadal.

La aproximación metodológica de mayor aceptación en la determinación de cambios en eventos extremos de precipitación ha sido la búsqueda de variables limitantes del sistema climático, particularmente en el ciclo hidrológico. Trenberth (1999b) y posteriormente Allen e Ingram (2002) argumentaron que, bajo condiciones de calentamiento global y humedad relativa constante, la relación Clausius – Clapeyron indica que la humedad específica y por tanto la humedad atmosférica debería incrementarse fuertemente con el aumento de la temperatura (del orden de 6.5% $K^{-1}$, Boer, 1993). Por tanto si los eventos extremos ocurren cuando efectivamente toda la humedad disponible en una parcela de aire se precipita y la intensidad de dichos eventos aumenta con la disponibilidad de humedad, se espera que los percentiles superiores de la distribución de probabilidad de lluvia estén limitados por el incremento en la relación Clausius – Clapeyron. En las zonas tropicales se espera que los flujos convectivos que producen la precipitación sean retroalimentados por los flujos de calor latente generados por la precipitación, presentándose una relación *súper Clausius* –

*Clapeyron* (Trenberth, 2003, Pall et al., 2006). Sin embargo esta relación puede ser atenuada por los efectos regionales y cambios en las teleconexiones (Trenberth, 2003).

En este trabajo se presenta el análisis de la estructura de la lluvia en términos de frecuencia e intensidad así como de la relación Clausius – Clapeyron para la isla de San Andrés a partir de datos diarios de precipitación y temperatura, para diferentes períodos de registro con el fin de identificar tendencias asociadas al impacto del cambio climático. Se involucra también el análisis durante la ocurrencia de las dos fases del fenómeno ENSO (El Niño Southern Oscillation), así como el estudio de tendencias en el perfil atmosférico de temperatura y en la ocurrencia de eventos de lluvia.

### 3.8.2 Metodología

Para el análisis de la estructura de la lluvia se evaluaron en primer lugar las rachas (número de días consecutivos en las mismas condiciones) de los días sin lluvia para cada uno de los años así como el número de eventos registrados para diferentes intervalos de intensidad durante cada año. Este tipo de análisis nos permite inferir de manera preliminar si se presenta un cambio en la estructura de la lluvia.

En segundo lugar se obtuvieron las curvas de distribución de frecuencia (CDF) de los eventos de lluvia a partir de un análisis de los percentiles de lluvia, asociados especialmente a los eventos más extremos. Se analizaron series de 5, 10 y 15 años de registro, con el fin de comparar diferentes épocas y capturar la variabilidad interanual y decadal.

Por último el análisis de la relación Clausius-Clapeyron, se basa en la asociación de eventos de lluvia a un correspondiente intervalo de temperatura atmosférica, de forma que se obtiene una distribución de la intensidad de lluvia para cada intervalo de temperatura. De cada distribución se calculan los percentiles 75%, 90%, 99% y 99.9% obteniendo tantos datos de cada uno de los percentiles como intervalos de temperatura se definan, de tal forma que se tiene un valor umbral de intensidad de precipitación para cada intervalo de temperatura asociado a una probabilidad de ocurrencia. Al graficar Intensidad vs. Temperatura en forma semilogarítmica, ya que la relación Clausius–Clapeyron es exponencial, se puede analizar cómo aumenta el umbral de precipitación con el aumento de temperatura y comparar con lo reportado en la literatura. Este análisis incluyó series de 10 años para años normales, así como cuatro series compuestas de los eventos ENSO ocurridos durante las decádas, setenta y ochenta y, noventa hasta el presente.

### 3.8.3 Resultados

Del análisis del número máximo de días sin ocurrencia de lluvias se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 29, en la cual la línea sólida azul representa la serie del número máximo de días consecutivos al año sin lluvia, mientras la línea punteada roja la línea de tendencia de la primera. Se observa que la serie presenta una tendencia decreciente, corroborada por la prueba de rangos de Wilcoxon, lo que indica un cambio en la estructura de la lluvia, con temporadas secas menos intensas. En el mismo sentido en la Figura 30 se muestra la serie del número anual de días sin lluvia; utilizando la misma convención de la figura anterior se concluye que existe una tendencia decreciente en el número de días sin lluvia, corroborada igualmente por la prueba de rangos de Wilcoxon. Lo anterior entonces confirma la disminución en la intensidad de las temporadas secas.

De otro lado las Figura 31 y Figura 32 muestran dos series; una primera serie (denominada Eventos) del número de eventos ocurridos durante un año dentro de un intervalo de intensidad de lluvia (mm/d) y una segunda serie (denominada Precipitación acumulada) de la cantidad de lluvia acumulada anual asociada a la serie Eventos. En las figuras mencionadas la línea sólida azul representa la serie Eventos, la línea punteada verde representa la serie Precipitación acumulada, la línea punteada roja la tendencia de la serie Eventos y la línea punteada gris la tendencia de la serie Precipitación acumulada.

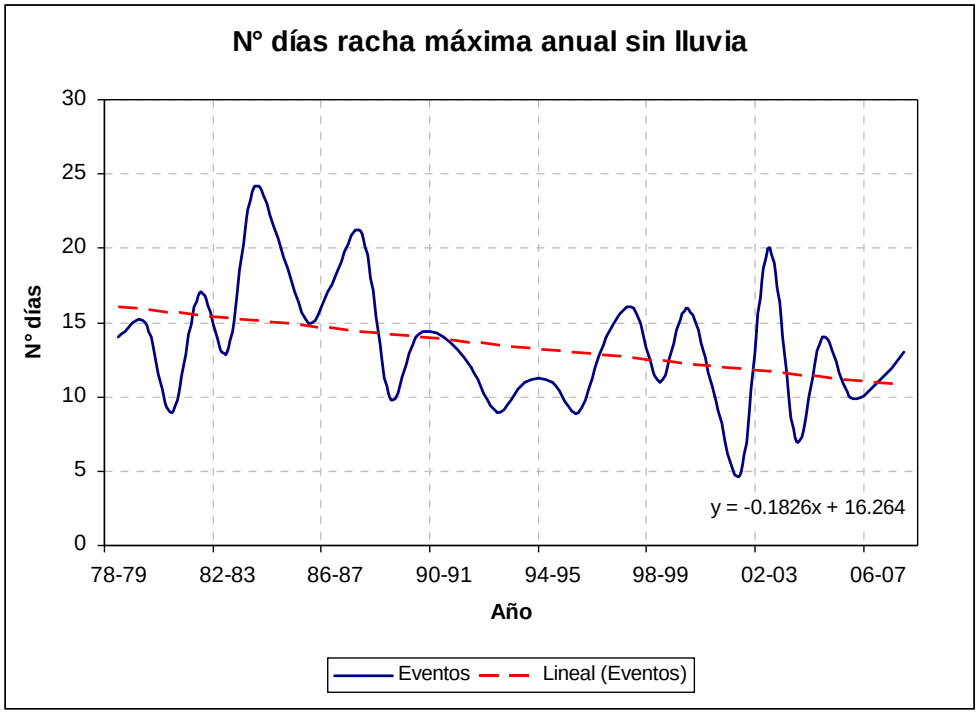


Figura 29. Número máximo de días sin lluvias al año

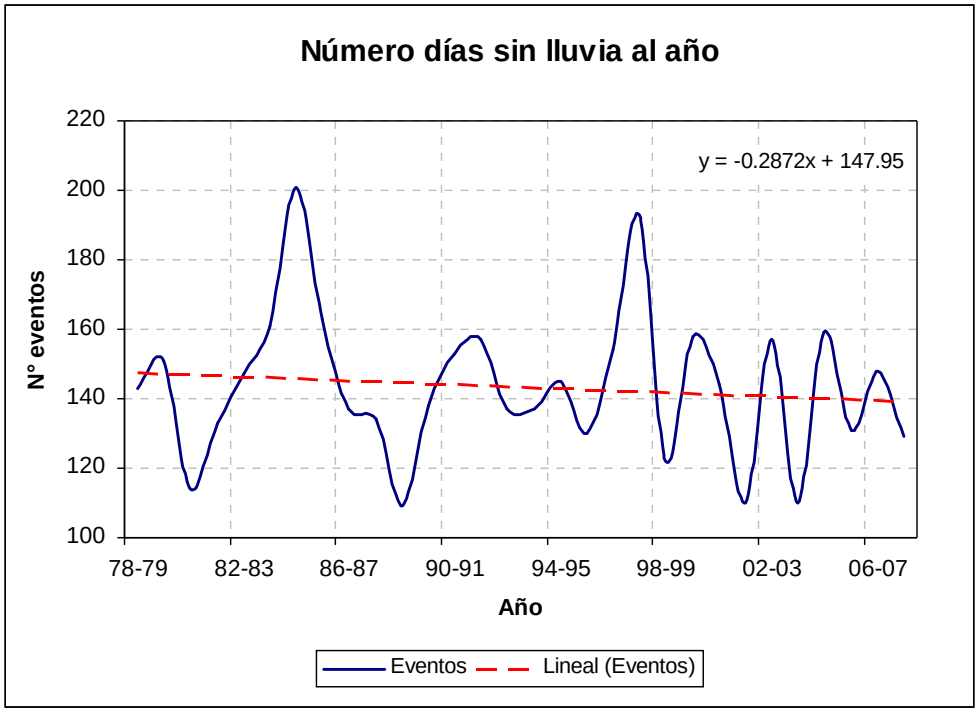


Figura 30. Serie del número anual de días sin lluvia

Para esta metodología se tomaron los siguientes intervalos de intensidad: 0-5 mm/d, 5-10 mm/d, 10-15 mm/d, 15-20 mm/d, 20-25 mm/d, 25-30 mm/d, 30-40 mm/d y mayores a 40 mm/d. El análisis

demostró que solamente se tiene tendencia estadísticamente significativa para los eventos dentro de los intervalos de intensidad de lluvia de 0-5 mm/d y 25-30 mm/d, que son los mostrados en las Figura 31 y Figura 32.

Para los eventos con intensidades entre 0-5 mm/d, se encontró además que, a pesar de que existe una tendencia creciente estadísticamente significativa, la cantidad de lluvia acumulada anual asociada a estos eventos es estadísticamente decreciente, por lo que se presentan eventos cada vez más frecuentes pero de menor duración. Sin embargo para los eventos con intensidades entre 5-10 mm/d, ambas tendencias son estadísticamente decrecientes, es decir eventos cada vez menos frecuentes y de menor intensidad. Finalmente se concluye de este tipo de análisis que de manera preliminarse evidencia un cambio importante en el patrón frecuencia – intensidad de la lluvia para la isla de San Andrés.

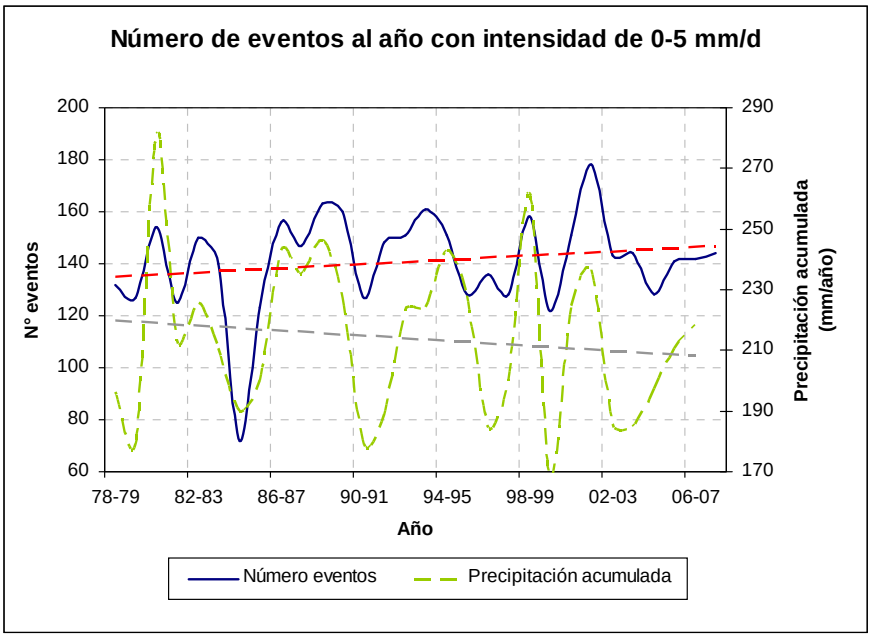


Figura 31. Serie del número anual de eventos de lluvia con intensidad entre 0-5 mm/d

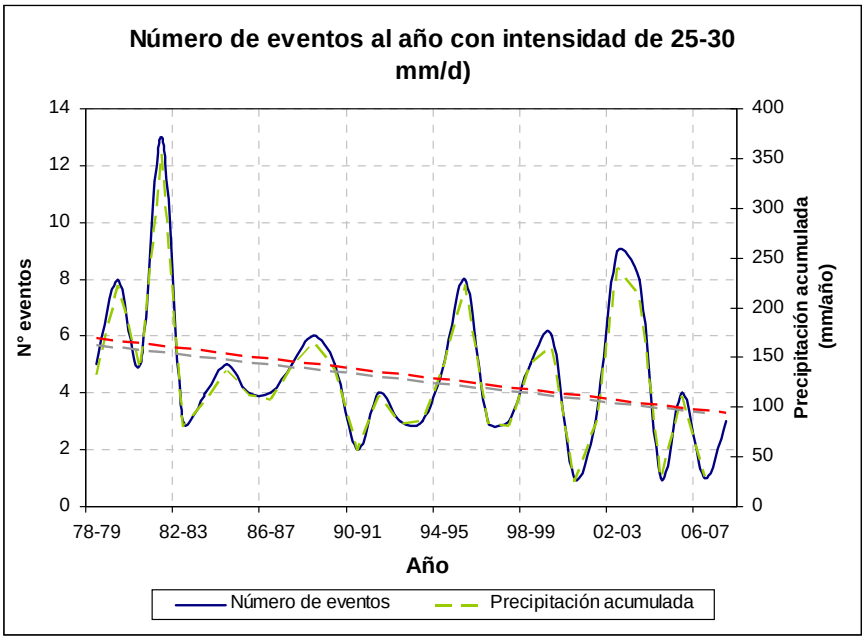


Figura 32. Serie del número anual de eventos de lluvia con intensidad entre 5-10 mm/d

La segunda metodología consistente en la identificación de las curvas de distribución de frecuencia (CDF) para diferentes épocas de la serie, arrojó los resultados mostrados a continuación. En las Figura 33, Figura 34 y Figura 35 se muestran las series de los percentiles 75%, 90%, 99%, 99.9% y 99.99% de la distribución acumulada de probabilidad de la lluvia para dos series de tiempo (la línea sólida roja representa un período de tiempo anterior al período representado por la línea sólida azul). En el eje principal de las ordenadas se encuentra la intensidad de precipitación en (mm/d) para cada percentil y en el eje secundario de las ordenadas el porcentaje de variación (en línea sólida gris) de dicha intensidad para la serie más reciente respecto a la serie más antigua.

En primer lugar para las series de tiempo completas (con y sin ocurrencia del ENSO) se encontraron diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Smirnov –Kolmogorov para las series de lluvia de los períodos comprendidos entre 1969-1974 y 2003-2008, como se muestra en la Figura 33. Se observa que la probabilidad de ocurrencia de eventos menos intensos (representados en los precentiles más bajos) es mayor para el período 2003-2008, mientras que para los eventos extremos de lluvia (percentil 99.9% en adelante) la probabilidad de ocurrencia es menor. Para los demás períodos de tiempo analizados no se encontraron variaciones importantes. Hay que tener en cuenta sin embargo, que estas variaciones pueden ser producidas por efecto de fenómenos macroclimáticos multidecadales y no por efectos de cambio climático.

Respecto a los años con ocurrencia del fenómeno ENSO, las Figura 34 y Figura 35, muestran los cambios en la CDF. En la caso de años con ocurrencia de El Niño se encontró un cambio estadísticamente significativo entre las distribuciones para los períodos comprendidos entre 1969-1982 y 1982-1995, con variaciones negativas de los percentiles superiores cercanas al 60%, es decir un fuerte disminución en los eventos extremos de lluvia para el período más reciente como lo indica la Figura 34; pese a esto, para el período 1995-2008 la distribución de probabilidades es estadísticamente igual a la del período 1969-1982.

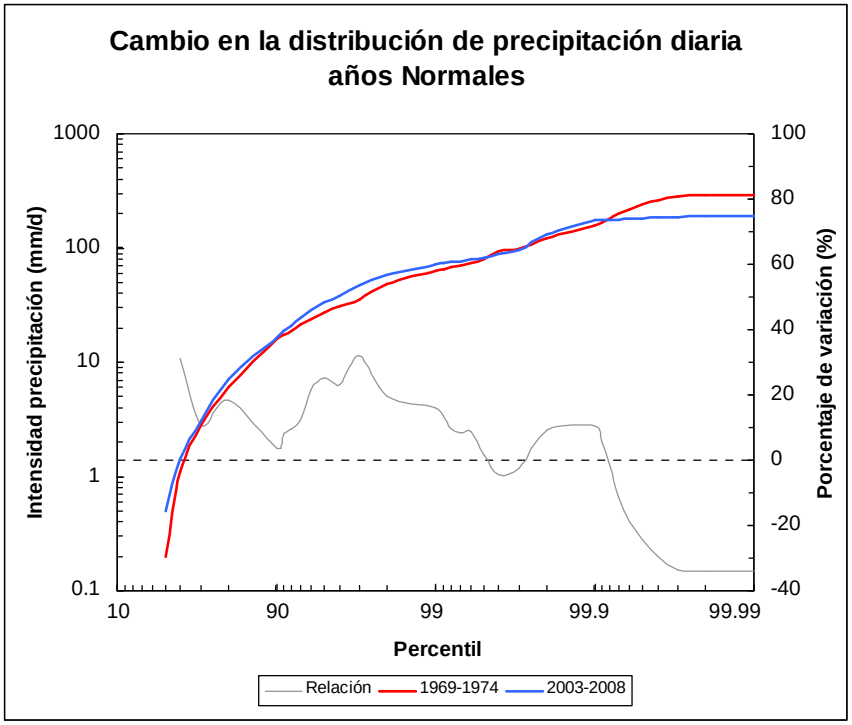


Figura 33. Cambio en la distribución de la precipitación diaria

Para años La Niña sin embargo ocurre lo contrario (Figura 35); el período 1982-1995 presenta una distribución estadísticamente igual al período 1969-1982, mientras que el período 1999-2008 muestra una distribución donde la probabilidad de ocurrencia de todos los eventos de lluvia es estadísticamente mayor respecto al período 1969-1982, presentándose una variación en el percentil 99.99% (asociado a los eventos más extremos) del orden del 40%.

En conclusión a pesar de que se muestran variaciones significativamente estadísticas en la distribución de probabilidad de eventos de lluvia, es prematuro asegurar que existe una tendencia clara como consecuencia del cambio climático global. Es necesario aclarar que siempre en un análisis relacionado con cambio climático se debe tener presente que las variaciones en el

comportamiento hidro-climático pueden estar relacionadas con fenómenos macroclimáticos y cambios naturales del sistema climático.

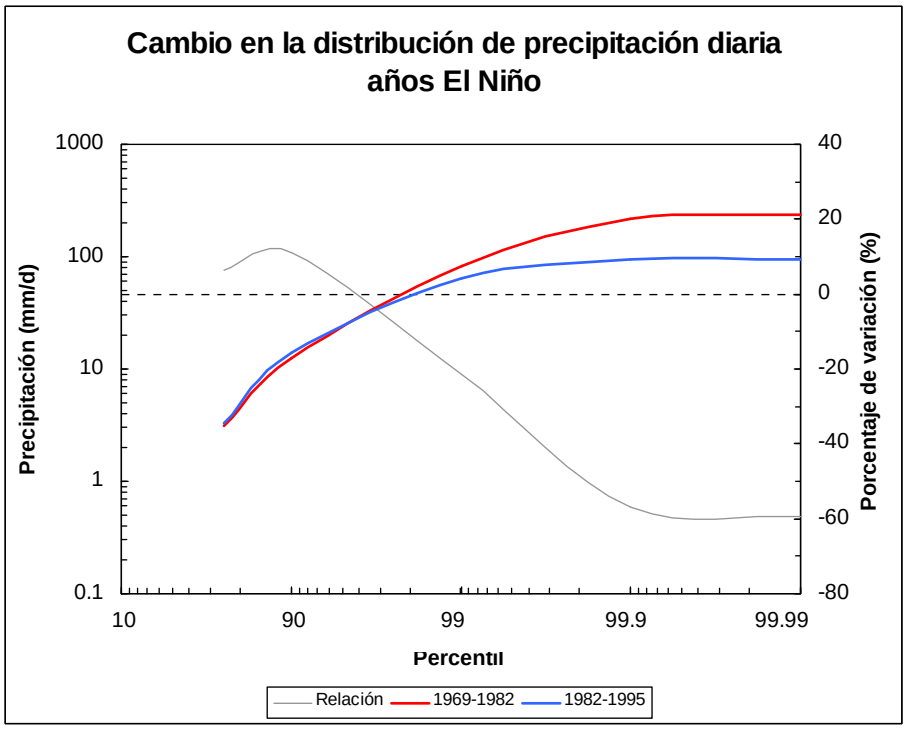


Figura 34. Cambio en la distribución de la precipitación diaria para años El Niño

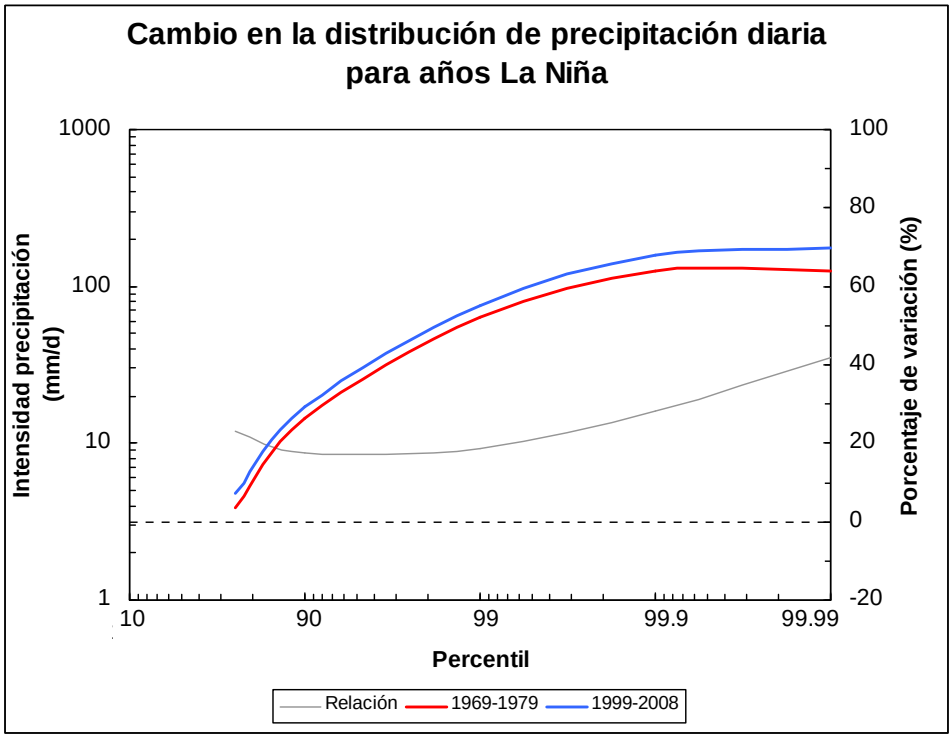


Figura 35. Cambio en la distribución de la precipitación diaria para años La Niña

# 4. Modelo conceptual

## 4.1 Introducción

La herramienta más importante para comprender la dinámica de un acuífero es el modelo conceptual, del que se desprenden todos los componentes de la evaluación hidrodinámica. El modelo conceptual involucra la identificación de las condiciones de recarga y descarga, las características de la roca permeable, las unidades estratigráficas y las condiciones hidrogeológicas locales: gradiente hidráulico, transmisividad y capacidad de almacenamiento. En la construcción del modelo hidrogeológico conceptual se deben seguir tres etapas: definición de las unidades hidroestratigráficas, balance hídrico y definición del sistema de flujo.

Las unidades hidroestratigráficas comprenden unidades geológicas de similares propiedades hidrogeológicas. Estas unidades forman la columna vertebral del modelo conceptual. La información hidrológica (precipitación, evaporación y cabezas piezométricas) y datos geoquímicos se usan para analizar el movimiento del agua subterránea a través del sistema. Con las cabezas piezométricas se definen zonas de recarga y descarga, conexiones entre acuíferos y sistemas de agua superficial. La definición del sistema de flujo puede basarse solamente en datos hidrológicos, pero es aconsejable utilizar datos geoquímicos donde sea posible para hacer mas robusto el modelo hidrogeológico conceptual.

Durante el proyecto “Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático”, se definió en modelo conceptual más adecuado de acuerdo a la información disponible. En el presenta capítulo se presenta además de las principales características definidas anteriormente, un sencillo modelo conceptual que simula los niveles piezómetricos en los pozos a partir del balance de masas entre precipitación, bombeo y flujo subterráneo. Adicionalmente en este capítulo se presenta una breve recopilación de la geología de la isla, tomada del directamente del proyecto.

## 4.2 Geología

San Andrés es una isla formada por el crecimiento de los corales alrededor de un cono volcánico que posteriormente se hundió, dejando un anillo coralino, que creció verticalmente. Según diversos autores esta actividad volcánica se inicio entre el Oligoceno y el Mioceno Inferior, posteriormente se depositaron sedimentos y cenizas volcánicas transportadas por el viento en su laguna interior formando un islote que se sometió a movimientos tectónicos que lo inclinaron hasta que emergió oblicuamente gran parte del arrecife occidental del antiguo atolón (UNAL, 2010).

En la isla de San Andrés se pueden reconocer cuatro tipos de litología con edades del Terciario al Cuaternario. La más antigua, que no aflora, corresponde a un basamento ígneo-volcánico, sobre la cual se encuentra la formación San Andrés conformada por calizas heterogéneas, de edad Mioceno, que afloran en la parte central de la isla y representan la zona de colinas suaves con alturas máximas de 87 m.s.n.m. La Formación San Luís constituye la región plana a suavemente inclinada de la plataforma arrecifal emergida y está conformada por calizas coralinas del Pleistoceno; la litología más reciente la componen los depósitos cuaternarios no consolidados. Las formaciones Terciarias han sido sometidas a procesos de fallamiento, fracturamiento y disolución (UNAL, 2010)

El basamento, aunque no aflora, probablemente está constituido por rocas similares a las aflorantes en la isla de Providencia, compuestas por andesitas, traqui-andesitas, diabasas y basaltos e intruídas por diques verticales de rocas ácidas a intermedias, de tipo cuarzo-dioritas de edad Oligoceno y Mioceno Inferior. Varios autores han inferido indirectamente la profundidad del basamento, ya no se ha detectado en ninguna perforación; por medio de un sondeo sísmico de refracción se situó aproximadamente el tope del basamento entre los -182 m y los -202 m de profundidad con respecto al nivel medio del mar (UNAL, 2010)

### 4.2.1 Formación San Andrés

Constituye la zona de colinas interior, conformada por un arrecife. Se caracteriza por presentar porosidad secundaria de grietas y karst con algo de porosidad primaria; y de otro lado se encuentran restos de fósiles tales como conchas de moluscos, equinoideos, corales mal conservados, foraminíferos y ostrácodos. De acuerdo con las perforaciones de piezómetros, ejecutadas en la parte central de la isla (Vargas M, 1997) en la Formación San Andrés la secuencia típica está conformada de abajo hacia arriba por:

**Calizas conglomeráticas:** Presente entre los 90 y los 150 metros de profundidad. Representadas por fragmentos de calizas subredondeadas con colores que varían desde el blanco hasta el gris verdoso, con tamaños que van desde 1 hasta 3 cm, embebidos en una matriz arcillosa calcárea de color verdoso.

**Areniscas:** Se encuentran inter - estratificadas entre el paquete de calizas, con tamaños de grano desde finos hasta grava en su base, de colores crema a gris oscuro, siendo notable la estratificación cruzada y laminación plana paralela. En la perforación PP-III-3, esta secuencia alcanzó los 32 metros de espesor y va variando transicionalmente en la vertical hasta tamaños de grano más finos. Como característica notable en ésta perforación, se observó la presencia de malaquita y azurita hacia la parte mas profunda.

**Arcillas:** Son arcillas calcáreas de colores blanco, pardo y amarillento, hasta negro, con espesores máximo de 15 metros, comúnmente fosilíferas. Al parecer este paquete es de forma lenticular y se va acuñando hacia el centro de la Isla.

**Calizas detríticas arenáceas:** Presentes desde los primeros 20 hasta los 50 m de profundidad. Son calizas compactas, karstificadas y fosilíferas de color predominantemente claro. En algunos casos con efectos de disolución, aumentando así la porosidad.

### 4.2.2 Formación San Luís

Constituye la parte plana de la Isla, con cotas que no sobrepasan los 10 m.s.n.m. Está constituida por calizas coralinas arrecífales con estratificación plana paralela en posición horizontal a subhorizontal. En sectores estas calizas coralinas se encuentran cubiertas por capas de humus arenoso de color rojizo poco consistente, que rellena las grietas y fisuras existentes. (Vargas G., 2004). Esta unidad de rocas constituye la plataforma continental de la Isla de San Andrés, que se manifiesta por desarrollar una morfología plana a ligeramente inclinada hacia el océano. También constituyen el material litológico de las islas y cayos aledaños.

Tomando como base algunos registros de perforaciones, se estima que el espesor de la plataforma arrecifal emergida denominada como Formación San Luís alcanza los 15m (Guzmán G. y Hernández, O., 1992). Los afloramientos de estas rocas se presentan principalmente en la zona costera, ya que al interior de la zona continental se presentan cubiertos por un suelo residual arcilloso de color rojizo y con espesores medios de 50 cm. Las calizas coralinas se muestran

superficialmente de color negro y con superficies rugosas. Son rocas de alta dureza, frescas a poco meteorizadas aunque presentan procesos de disolución química. Localmente se presentan planos de diaclasas abiertas y con rellenos de material calcáreo y férreo. (Vargas G, 2004).

### 4.2.3 Geología estructural

La estructura principal es la inclinación hacia el Este de las capas que conforman la unidad geológica de San Andrés. Se destacan tres fallas: del Cove, de San Andrés y de Punta Hansa (Vargas G, 2004). La falla del Cove corresponde a una falla geológica de carácter vertical, destral (Vargas M, 1997), de 3.5 km de extensión y cubierta superficialmente por suelos residuales arcillosos de espesor considerable. Esta estructura está asociada a varias dolinas y a las mayores transmisividades en la formación San Andrés. Esta estructura probablemente sirve como camino preferencial de recarga a un lente de agua dulce localizado en el sector urbano de la isla.

La falla de San Andrés se localiza sobre la zona montañosa de la isla, en su costado noroeste. Esta falla se caracteriza por su expresión (rectilínea) y contraste morfológico, la formación de silletas de falla. Presenta una extensión aproximada de 4 km. y una dirección aproximada de N45ºE. La orientación exacta del plano de falla no se conoce con precisión dada la escasa exposición de los afloramientos que afecta, pero por su expresión morfológica y la medición de algunas estructuras asociadas (espejos y estrías de falla) se considera que es una falla de tipo normal con un plano de falla de bajo ángulo, inclinado hacia el Este. Otras evidencias de esta falla se presentan al Norte, bajo las rocas de la formación San Luís, con zonas de recarga y acuíferos en la parte norte de la isla, lo que indica su prolongación en dirección NE. Por otra parte, técnicos de la armada (información verbal) estiman que algunas anomalías batimétricas y geofísicas al Norte de la Isla y sobre el fondo marino podrían estar asociadas a esta estructura (Vargas G, 2004).

La falla de Punta Hansa es una estructura definida por la interpretación de fotografías aéreas del año 1944, localizada en la región de Punta Hansa en el extremo noreste de la Isla, con dirección N55E, que muestra claramente un movimiento de rumbo sinestral, en el cual el bloque oriental se desplazó hacia el noreste y el bloque occidental hacia el suroeste.

## 4.3 Geometría y tipo de acuífero

El acuífero de la isla consiste en dos unidades hidroestratigráficas con características geológicas kársticas, ambas clasificadas como acuíferos libres, denominadas acuífero San Andrés (Tsa) y acuífero San Luis (Tsl). El acuífero San Andrés comprende un área superficial de 17.13km² del territorio insular, con alturas entre los 4 y 85 m.s.n.m. y el acuífero San Luís con un área superficial de 9.89km², con alturas entre los 0 y 44 msnm, presentándose las máximas en el nororiente y occidente de la isla (Figura 36).

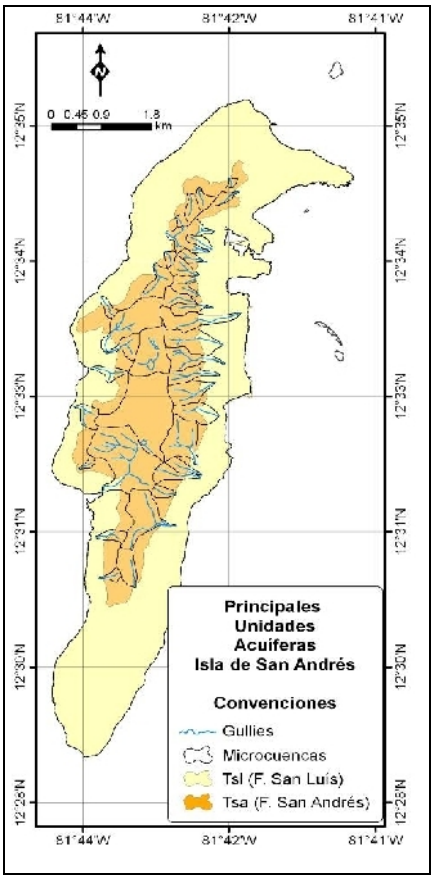


Figura 36. Unidades hidroestratigráficas principales de la isla de San Andrés (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático")

El basamento ígneo se asumió 200 m por debajo del nivel del mar, con base en los rangos estimados en diferentes estudios sobre el tema, primordialmente del trabajo de INGEOMINAS (1997). Dados los espesores de los dos acuíferos se podría considerar el modelo hidrogeológico con una sola capa hidroestratigráfica, sin embargo debido a las diferencias en características como la recarga y la

calidad de agua se hace la separación. En la Figura 37 se presenta el esquema del modelo hidrogeológico conceptual.

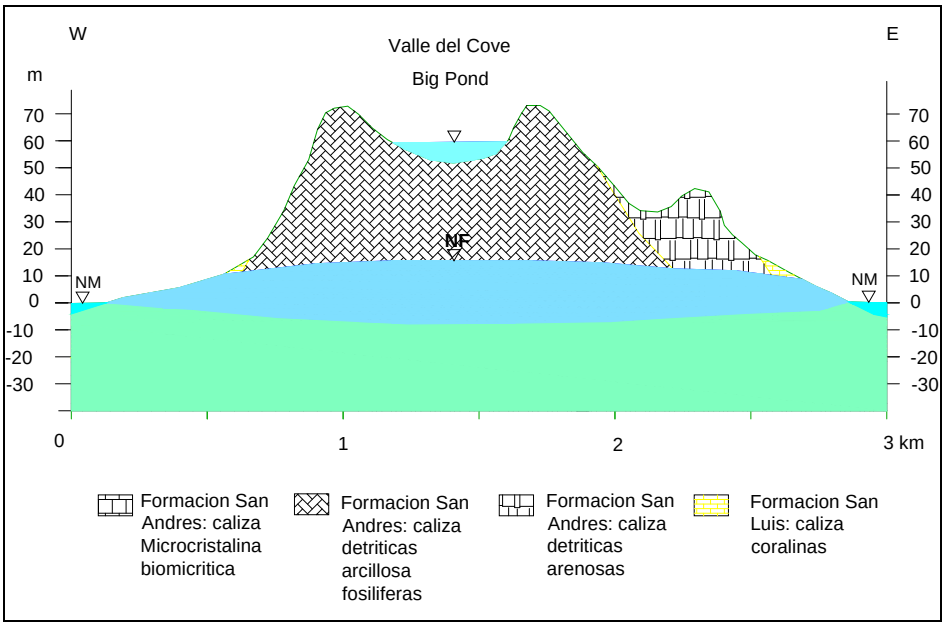


Figura 37. Esquema de la geometría del modelo hidrogeológico conceptual (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático")

## 4.4 Niveles piezométricos

En la cuenca del Cove los niveles estáticos pueden alcanzar valores de 10 m.s.n.m. en las zonas altas de la cuenca durante la temporada húmeda del año (junio-noviembre) y se registran valores por debajo del nivel del mar cuando coinciden explotación y épocas de verano, principalmente en la zona de fallas de la cuenca del Cove donde se encuentran la mayoría de los pozos profundos.

En la formación San Luís, los niveles oscilan entre pocos centímetros hasta 4m de profundidad y se reporta con el análisis de diferentes pruebas de bombeo que la variación de los niveles piezométricos responde con la marea dada la cercanía al mar. Cabe anotar que los niveles de marea oscilan en promedio entre 30 cm y 60 cm.

## 4.5 Permeabilidades

La zona de mayor interés para el estudio hidrogeológico dada su productividad es la cuenca del Cove, zona ubicada en el centro de la formación San Andrés con un área de 3 km². La hipótesis que se tiene es que allí se presenta la disolución kárstica más intensa debido a la densidad del diaclasamiento (entre 15 y 70%) que influye fuertemente en el parámetro de permeabilidad del acuífero y la presencia de geomorfologías típicas de paisajes kársticos como las dolinas. De acuerdo al análisis de pruebas de bombeo (que se muestra más adelante), las zonas de mayor permeabilidad se encuentran asociadas a la Falla del Cove con valores de 30 m/d, mientras en zonas más alejadas, se presentan valores con un orden de magnitud menor. Dentro de las suposiciones más fuertes se encuentra el aumento importante de permeabilidad a lo largo zonas de falla y lineamientos en la dirección del flujo de agua subterránea para simular una posible red canales no conocida; este tipo de metodología ha sido probada en modelación de acuíferos kársticos mejorando notablemente los resultados obtenidos. Se debe recordar que el software empleado para el modelo numérico que se desprende de este modelo conceptual está diseñado para acuíferos de medios porosos no pudiendo simular una red de conductos, por lo cual esta metodología es una herramienta muy potente para la modelación de karst (Worthington, 2009)

### 4.5.1 Análisis de pruebas de bombeo

El análisis de pruebas de bombeo permite obtener datos sobre las propiedades hidráulicas del acuífero en estudio, así como las condiciones geológicas y geomorfológicas del mismo, tales como barreras impermeables, zonas de recarga, etc. Para el caso de la isla de San Andrés estos análisis se han realizado por métodos tradicionales para acuíferos de medios porosos; sin embargo las condiciones geológicas de la zona, en especial la zona de fallas ubicada en el Cove, sugieren la utilización de métodos que consideren el concepto de doble porosidad, cuya aplicación permite representar, de manera más adecuada, el comportamiento de un acuífero en un medio fracturado.

El concepto básico de doble porosidad supone que la descarga del acuífero se da principalmente a través del sistema de fracturas, y que a su vez dicho sistema es alimentado por un flujo proveniente de la matriz de los bloques. En este concepto han trabajado Warren – Root (1963), con flujo en estado pseudo-estacionario y Moench (1984, 1994) que introduce la suposición de un recubrimiento

de baja permeabilidad que no permite el flujo libre entre la matriz y las fracturas. La Figura 38 muestra el concepto de doble porosidad, donde se observan los bloques y el sistema de fracturas; igualmente la Figura 39 muestra el concepto planteado por Moench sobre la presencia de un recubrimiento entre los bloques y las fracturas.

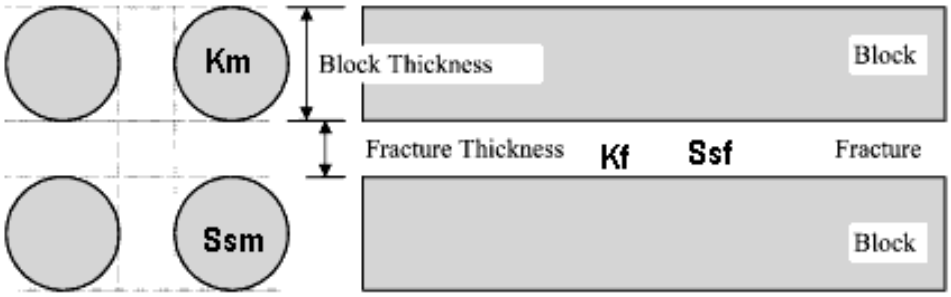


Figura 38. Concepto de doble porosidad

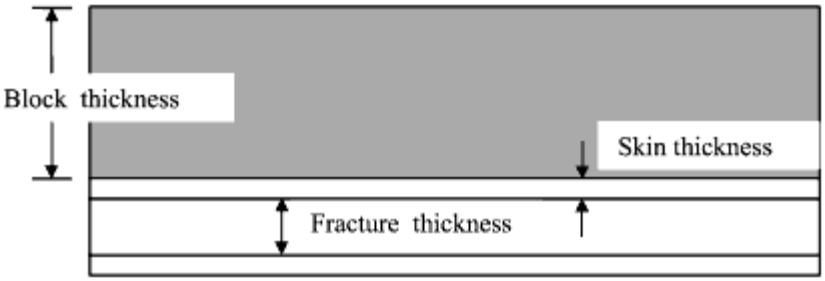


Figura 39. Concepto de doble porosidad y recubrimiento (Moench, 1984)

Los parámetros adicionales utilizados por éstos métodos se muestran en la Tabla 8

**Tabla 8.** Parámetros adimensionales utilizados por los modelos de doble porosidad

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Método Doble porosidad (Warren and Root) | $\Lambda = \frac{\alpha r^2 K_h'}{K_h}$ | $\sigma = \frac{S_S'}{S_S}$ | $r_D = \frac{r}{r_W}$ | |
| Método Doble Porosidad (Moench) | $\gamma = \left(\frac{r_W}{b'}\right)\left(\frac{K'}{K}\right)^{1/2}$ | $\sigma = \frac{S_S'}{S_S}$ | $r_D = \frac{r}{r_W}$ | $SF = \frac{K' b_S}{K_S b'}$ |

Donde Λ y γ representan la relación entre la permeabilidad del sistema de fracturas y la del sistema de bloques, σ está dado por la relación entre los coeficientes de almacenamiento de ambos sistemas y SF es la relación entre la permeabilidad del sistema de bloques y el entre la permeabilidad del sistema de bloques y el recubrimiento de los mismos.

Para el análisis de las pruebas de bombeo se utilizaron las variables adimensionales de tiempo y abatimiento, generadas en el programa Aquifer Test, que están definidas por:

$$t_D = \frac{Tt}{r^2 S}$$

$$s_D = \frac{2\pi Ts}{Q}$$

Donde T: transmisividad, t: tiempo transcurrido desde el bombeo, r= distancia radial al pozo de bombeo, S: coeficiente de almacenamiento, s: abatimiento, Q: caudal de bombeo.

De esta manera sólo es necesario ajustar la curva de los puntos medidos, a la curva teórica generada por cada uno de los métodos.

En general el comportamiento de un acuífero fracturado ante la extracción de un caudal determinado, consiste inicialmente en un flujo derivado principalmente del almacenamiento en el sistema de fracturas y luego derivado principalmente del almacenamiento de los bloques. Bajo la suposición de un estado pseudos-estacionario el comportamiento del abatimiento en la primera y la última parte del bombeo se aproxima a la curva típica de Theis, y entre estos dos momentos se presenta en general una meseta

Las Figura 40, Figura 41 y Figura 42 muestran el análisis de la prueba de bombeo para el pozo 6, con los métodos de Theis, Moench y doble porosidad. De estas figuras se puede concluir fundamentalmente que los valores de los parámetros obtenidos por los métodos que se basan en el concepto de doble porosidad son del mismo orden de magnitud que los calculados por el método de Theis; sin embargo si se puede comprobar que estos primeros representan de forma más adecuada el comportamiento del acuífero. Igualmente se realizaron análisis para los pozos 4, 5, 6, 10, 8, 13 y 22, obteniéndose resultados similares.

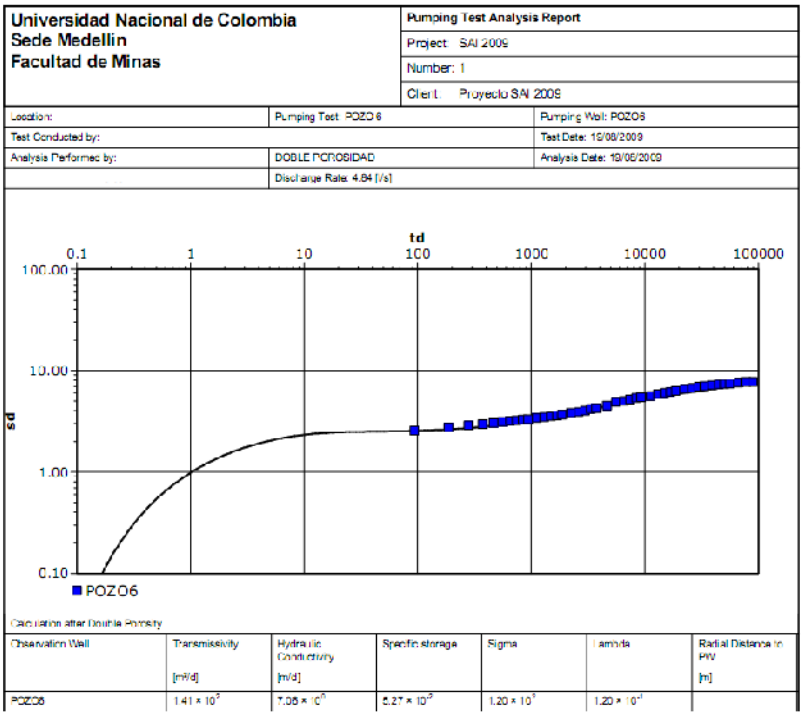


Figura 40. Análisis prueba de bombeo pozo 6 (Método Doble Porosidad)

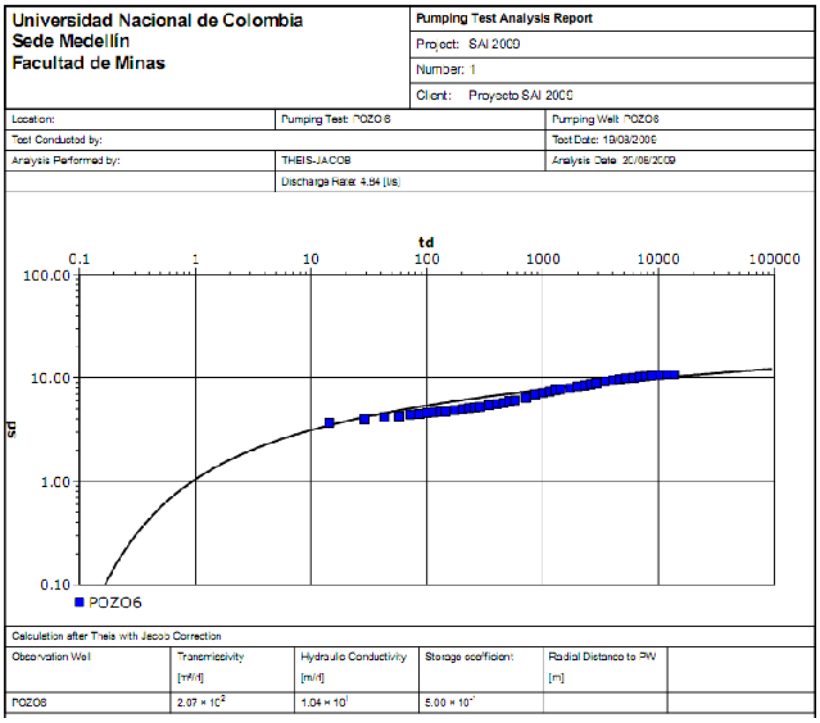


Figura 41. Análisis prueba de bombeo pozo 6 (Método Theis)

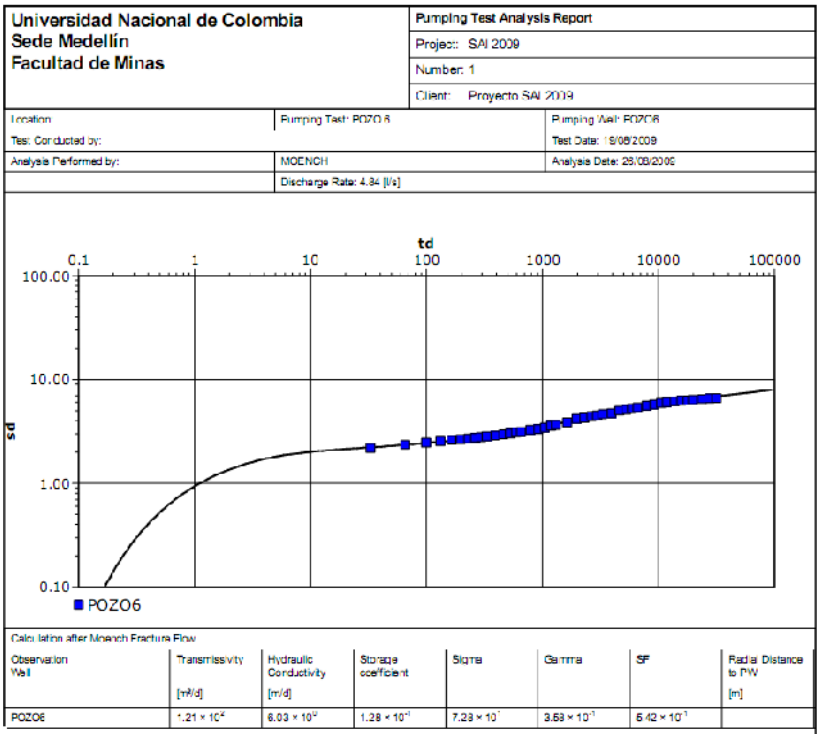


Figura 42. Análisis prueba de bombeo pozo 6 (Método Moench, 1984, 1994)

A partir de las pruebas de bombeo de los pozos 4, 5, 6, 10, 8, 13 y 22 se obtuvo el gráfico que muestra de manera aproximada la variación espacial de la permeabilidad (k) en la zona del Cove (ver Figura 43). Se observa que los mayores valores se encuentran precisamente en la zonas de intersección de las fallas, con permeabilidades del orden de 15 m/d, mientras que para las otras zonas muestreadas se dan valores entre 5 m/d y 10 m/d. En estudios anteriores se había encontrado que para la zona del Cove la permeabilidad promedio es del orden de 10 m/d, consecuente con los resultados obtenidos. Sin embargo dadas las condiciones de fracturamiento y los altos valores de k encontrados para estas zonas, se podría considerar una zona de mayor permeabilidad en un corredor a lo largo de la dirección preferencial del sistema de fracturas. Los valores para cada pozo se muestran el la

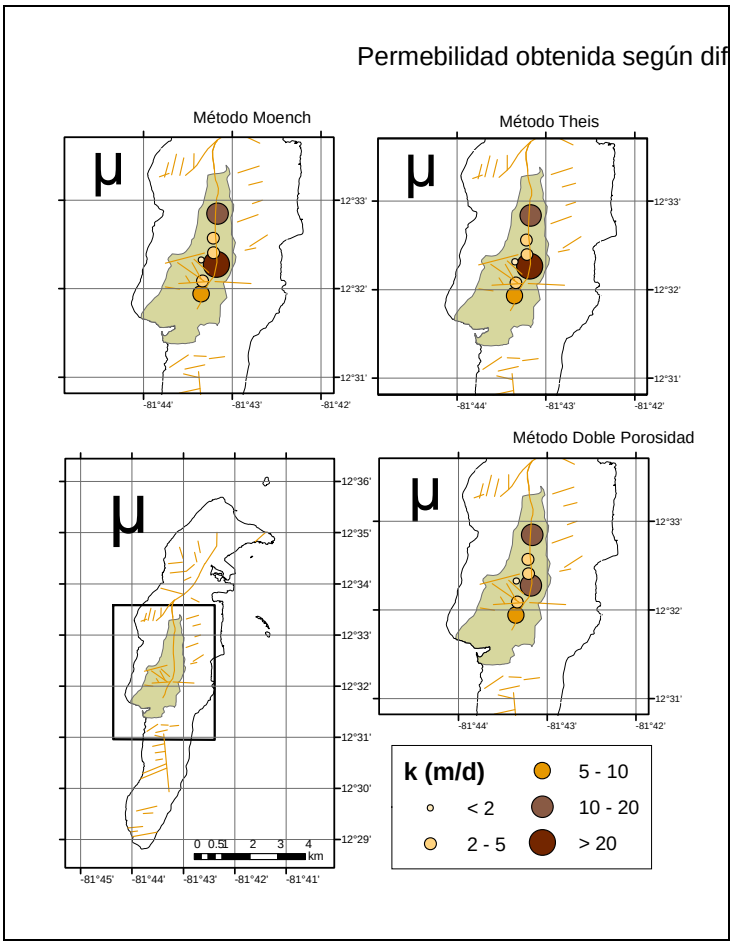


Figura 43. Variación especial de la permeabilidad en la cuenca del Cove según varios métodos de análisis

Tabla 9. Valores de permeabilidad obtenidos según varios métodos de análisis

| POZO | PERMEABILIDAD (m/d) | | |
|---|---|---|---|
| | THEIS-JACOB | DOBLE POROSIDAD | MOENCH |
| 6 | 4.9 | 3.8 | 3.5 |
| 10 | 20.1 | 12.1 | 11.4 |
| 8 | 4.8 | 2.8 | 2.7 |
| 13 | 2.1 | 2.2 | 3.9 |
| 4 | 24.4 | 16.1 | 16.6 |
| 22 | 8.0 | 7.0 | 7.2 |
| 5 | 1.5 | 0.2 | 0.5 |

## 4.6 Direcciones de flujo

Las direcciones de flujo en la isla presentan dos líneas predominantes: Un flujo radial divergente desde la divisoria de la cuenca del Cove hacia el resto de la isla evidenciándose zonas de descarga en la línea de costa, y una zona convergente desde los límites de la cuenca del Cove hacia la zona de la Falla del Cove (longitud de aproximada de 4 km  e incidencia de fracturamiento de 40%), que funciona como zona de receptora del flujo (ver Figura 44).

## 4.7 Recarga

Los procesos más importantes de recarga se presentan sobre la formación San Andrés especialmente en la Cuenca del Cove donde la rápida respuesta de los niveles a las intensidades de la lluvia muestran el alto dinamismo del acuífero (confirmado en estudios como el PMAS, 1999). Sin embargo este comportamiento no se evidencia en otras zonas de la isla (redes de piezometría Norte y Centro), por lo que se supone que sobre la zona del Cove se presentan las calizas mas intensamente fracturadas, que favorecen considerablemente los procesos de infiltración y percolación. Como se mencionó anteriormente en el capítulo 2 la influencia de eventos macroclimáticos como el ENSO sobre la hidrología de la isla pueden alterar las tasas de recarga considerablemente debido a la disminución o aumento de la precipitación ya que se dan diferencias hasta de 60 mm. por mes entre años La Niña y años normales.

La recarga entonces fue estimada para años sin ocurrencia de ENSO y años El Niño y La Niña, como se menciona en el capítulo 2. los valores obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10.  Valores de recarga para las diferentes condiciones de lluvia

| **Tipo Año** | **Fecha** | **R (mm/año)** | **Prec. (m/año)** | **R/P (%)** |
|---|---|---|---|---|
| Seco | Nov 1991-nov1992 | 255 | 1503 | 15 |
| Normal | Nov 2006-nov2007 | 498 | 1918 | 26 |
| Húmedo | Nov 2007-nov2008 | 810 | 2462 | 33 |

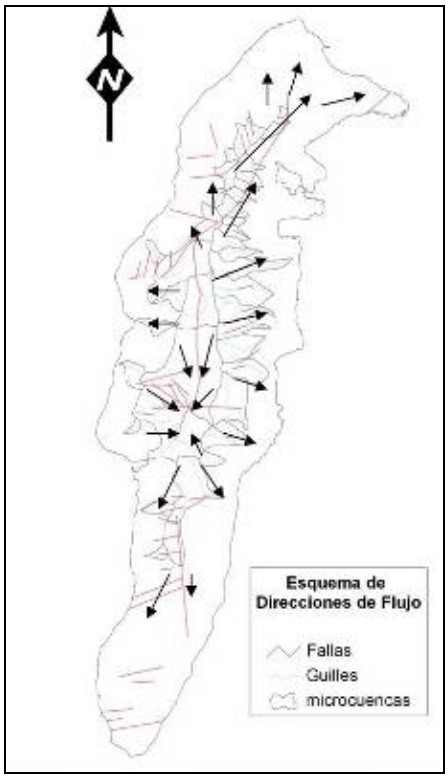


Figura 44. Esquema de direcciones de flujo del agua subterránea en la isla (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático")

Para la refinación del modelo conceptual se realizaron simulaciones a escala mensual de los niveles piezométricos de los pozos de la zona del Cove aplicando la metodología de los modelos pluricelulares englobados (Sahuquillo, 1983); según este modelo el flujo de un acuífero hacia sus emergencias se puede expresar por la suma de un número de depósitos lineales. Este modelo ha sido aplicado para la simulación de caudales de manantiales en acuíferos kársticos (Vélez et al., 1997); sin embargo modificando en la ecuación de balance los caudales de intercambio y de salida por niveles en los tanques del modelo es posible simular el comportamiento del acuífero a nivel local, dadas las siguientes suposiciones.

En primer lugar se tiene un sistema de pozo, alimentado por tres tipos de flujo, dada su naturaleza kárstica; un flujo lento a través de la matriz no karstificada, un flujo intermedio a través de las zonas de fracturas y un flujo rápido a través de conductos. Estos tres sistemas son representados mediante tres tanques afectados por dos acciones elementales; un porcentaje de la recarga total de la cuenca que depende de la ubicación geográfica del pozo y el bombeo actuante sobre la cuenca hidrogeológica de cada pozo, ésta última supuesta a partir del patrón de flujo del acuífero.

Para la estimación de la recarga se tomó la formulación propuesta por Témez (1977), (Figura 45), en la cual se supone que una parte de la precipitación se almacena en el suelo y contribuye a la evapotranspiración, y los excesos de lluvia (cuando el suelo alcanza su máxima capacidad de saturación) se transforman en una fracción de escorrentía superficial y una fracción de percolación que finalmente se transforma en recarga. Todos los factores que intervienen el proceso, como porcentajes de escorrentía y percolación y capacidad máxima de saturación se calibran durante la simulación.

El esquema del modelo conceptual se muestra en la Figura 46 donde la celda final representa el nivel dinámico del pozo. Los parámetros $B_{J(t)}$ representan una serie de elementos que actúan sobre el sistema (recarga J=r, bombeos lejanos J=L, bombeos intermedios J=m, bombeos cercanos J=c). Como puede observarse en la celda de salida actúa también un bombeo ($B_{cs}$) para la simulación de los niveles dinámicos, así como la salida de un caudal $Q_{ma}$, que representa en este caso el flujo hacia aguas abajo del acuífero.

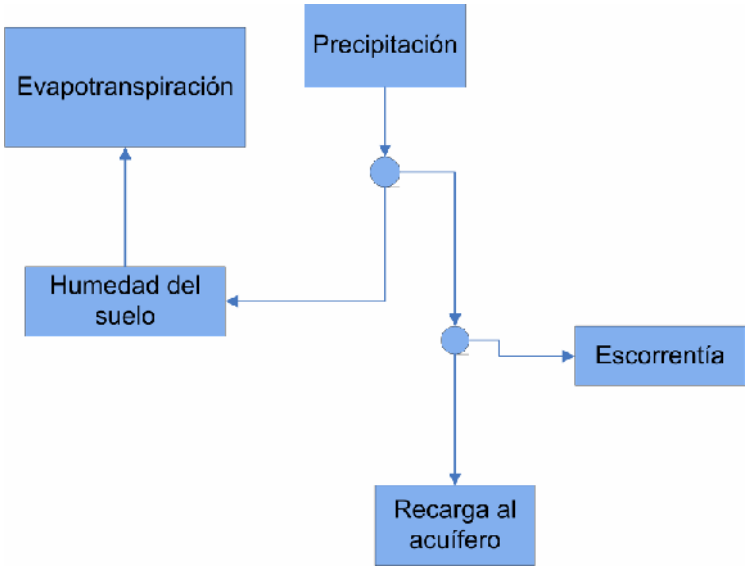


Figura 45. Metodología para la estimación de la recarga propuesta por Témez, 1977

La ecuación de balance en cada una de las celdas, excepto en la de salida es:

$$h_{i(t)} = h_{i(t-dt)} + \frac{(B_{ri(t)} - B_{Li(t)} - B_{mi(t)} - B_{ci(t)} - q_{i(t)})dt}{ae}$$

En la celda de salida la ecuación de balance

$$H_{s(t)} = H_{s(t-dt)} + \frac{(Q_{ma} - B_{sc} + \sum_{1}^{3} q_{i(t)})dt}{ae}$$

Donde: $q_{i(t)}$ es el intercambio entre la celda i y la celda de salida en el tiempo t, que se estima en función de la diferencia de altura entre estas celdas, $Q_{ma}$ es el flujo de salida hacia aguas abajo del acuífero que está condicionado a que el nivel en la celda de salida ($H_s$) exceda un nivel mínimo ($H_{min}$) y $ae_i$ es el área efectiva de cada celda.

$$q_{i(t)} = \alpha_i \left(H_{i(t-dt)} - H_{s(t-dt)}\right) \qquad Q_{ma} = \begin{cases} 0 & si \quad H < H_{\min} \\ (H_s - H_{\min})\alpha_s \end{cases}$$

Las áreas efectivas de las celdas principales para la simulación de caudales se definen en función de los coeficientes de reparto de la recarga ($B_{r(i)}$), el coeficiente de almacenamiento (S) y el área total ($A_t$)

$$ae_i = S * A_t * B_{ri}$$

Con base en el principio de superposición se obtiene la siguiente expresión para el área efectiva de la celda de salida

$$ae_s = S * A_t * \sum_{1}^{3} \alpha_i B_{ri} / dt$$

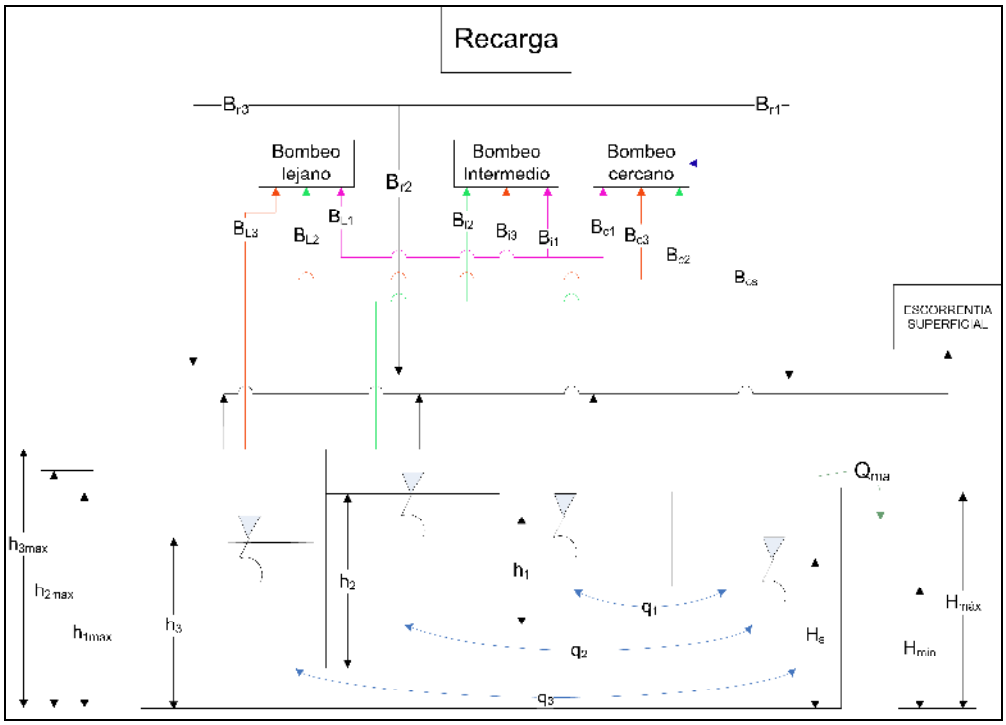


Figura 46. Esquema del modelo conceptual de modelo pluricelular englobado (Modificado de Sauquillo, 1983 y Vélez et al., 1997)

Sin embargo para el caso del cálculo de niveles en la celda de salida, sólo se toma el área efectiva donde actúa el pozo de bombeo, para calcular adecuadamente el nivel dinámico.

Para el proceso de calibración se tomó el promedio mensual de los niveles dinámicos de los pozos 8 y 10 en el período comprendido entre febrero de 1990 y diciembre de 1998 por ser los registros de más largo período y más completos. Los parámetros iniciales para ambos pozos se muestran en la Tabla 11.

En la Figura 47 se muestra la simulación obtenida para el pozo 8; se observa que la simulación reproduce de manera adecuada los ciclos de recarga del acuífero; sin embargo dado que se tomaron promedios mensuales históricos de bombeo y tratándose de una estructura kárstica poco estudiada la simulación no reproduce fielmente la variación en los niveles dinámicos de los pozos. De la simulación se concluye que el sistema responde rápidamente a las temporadas de lluvia, presentando variaciones de hasta 10 m en la cabeza piezométrica en cortos períodos de tiempo.

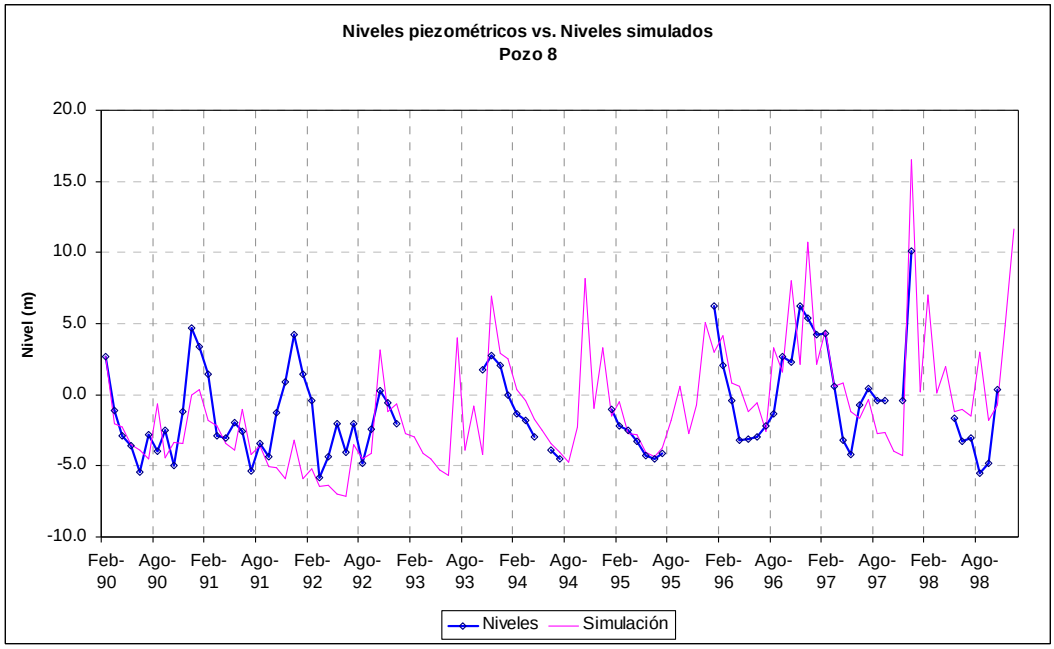


Figura 47. Simulación de los niveles piezométricos para el Pozo 8. Correlación 0.69

Tabla 11. Valores de los parámetros iniciales del modelo de tanques

| Parámetro | Valor |
|---|---|
| Coefieciente de almacenamiento | 0.25 |
| Porcentaje de área de recarga | 0.65 |
| Capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm.) | 100 |

## 4.8 Calidad de agua

Dado que sobre la formación San Andrés se encuentra la principal zona de recarga en la isla (Huggeth A., 1989, Vargas M, 1997, PMAS 1999) el agua presenta conductividades menores a 1250 µS/cm y en general se clasifica en su mayoría como bicarbonatada cálcica. En la formación San Luís, las conductividades eléctricas alcanzan los 55000 µS/cm en algunos sectores y generalmente el agua se clasifica como Clorurada-Sulfatada, excepto en la zona nororiental y parte de la oriental, donde se infiere que existe un lente de agua con menor salobridad (de acuerdo a las características geoquímicas del agua en esta parte de la isla), esto se atribuye a la existencia de una zona de descarga preferencial desde el acuífero San Andrés.

## 4.9 Caudales y tipo de explotación

La cuenca del Cove es la zona de mayor importancia dadas las características anteriormente mencionadas y es la fuente hídrica para surtir parte importante de la demanda de la isla. La explotación se lleva a cabo principalmente mediante pozos profundos perforados en la zona de la falla del Cove. El campo de pozos se empezó a explotar desde 1966 con caudales iniciales de 25 l/s, alcanzando valores de 50 l/s para el año 1985 en donde se presentaron síntomas de sobreexplotación en el acuífero y se tomaron medidas de gestión para lograr un caudal concesionado actual de 30 l/s.

En la formación San Luís la explotación consiste principalmente en extracción del agua subterránea por medio de aljibes y barrenos, con caudales bajos de explotación y en muchos casos extrayendo agua salada para procesos de desalinización. Se estima que la explotación de aljibes y barrenos alcanza conjuntamente los 100 l/s (PMAS, 1999).

## 4.10 Intrusión salina

La interfaz agua dulce agua salada se profundiza de los bordes costeros hacia el centro de la isla con valores típicos de 5 m de profundidad en las áreas de playa y encontrándose el lente de agua dulce que flota sobre el agua salada bajo la formación San Andrés, a profundidades promedio de 150 m bajo el nivel del mar, calculados con la relación de Ghyben Herzbeg (ver Vélez, 2004 pp. 258) y confirmados por los estudios geoeléctricos realizados en la isla.

El lente es más espeso bajo las zonas de mayores alturas, un poco menos en la zona del Valle del Cove influenciado tanto por las menores cotas del terreno y del nivel freático, así como por la operación del campo de pozos que favorece la formación de conos ascendentes salobres. El problema de salinización está fuertemente relacionado con la profundidad de perforación de los pozos cuando se sobrepasa la zona de mezcla, como en el caso de los pozos 16, 17 y 18 al oriente del campo de pozos del Cove.

La configuración batimétrica de la costa ha influido en los procesos de karstificación y formación de cavernas y por lo tanto en la salobridad y dinámica de las aguas subterráneas en los acuíferos de la Isla. En la parte Oriental y Nororiental, se presentan pendientes suaves, el mar es poco profundo, se favorecen los procesos de sedimentación, y, por ello, la formación de cuerpos lénticos

(manglares). El arrecife ofrece protección contra la fuerza de impulsión de las olas en esta parte de la isla (que corresponde a la formación San Luis) restringiendo la abrasión y penetración del mar en el acuífero, este es el motivo por el cual se presentan aguas más dulces respecto a la parte occidental de la Isla donde la batimetría presenta pendientes fuertes (mar abierto y profundo) y no existe amortiguamiento al efecto de las olas, por ello los sistemas de karst generados por el agua dulce se unen con los producidos por el agua de mar aumentando la salinidad considerablemente a nivel superficial (Diezzman, 1957). Esto se verifica contrastando las conductividades en ambas zonas de la isla.

# 5. Modelo numérico

## 5.1 Introducción

El modelo numérico es una herramienta importante para la gestión y la explotación sostenible de las aguas subterráneas, toda vez que permite simular el comportamiento del acuífero ante posibles estrategias de explotación y de manejo, así como bajo condiciones hidrológicas diferentes debidas al efecto del cambio climático.

Los parámetros más sensibles durante la calibración del modelo son las propiedades hidráulicas, especialmente la conductividad, y la recarga. Durante el proyecto "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático", se calibró el modelo numérico con base en la información existente, de manera que los resultados obtenidos representaban adecuadamente el comportamiento del acuífero. Para este trabajo se hizo un esfuerzo por mejorar la calibración de dicho modelo a partir de la suposición de zonas de mayor conductividad hidráulica a lo largo de las dos fallas principales (Falla de Cove y Falla San Andrés) y en las zonas de lineamientos, dado los buenos resultados obtenidos en estudios de otros acuíferos (Worthington, 2009). Sin embargo las principales características del modelo, como condiciones de frontera, tamaño de malla, número de capas se conservaron y se muestran también en este capítulo.

## 5.2 Descripción del software

El programa más ampliamente usado para modelar el flujo subterráneo es el desarrollado por la USGS llamado MODFLOW, McDonald y Harbaugh (1984), el cual usa métodos de diferencias finitas para simular flujo tridimensional (Harbaugh et al., 2000). En el presente estudio se implementó la interfaz brindada por el Programa Visual MODFLOW 2009.1 Premium, el cual incorpora el modulo SEAWAT 4.0 y permite el pre-procesamiento de datos y post-procesamiento

de los resultados. El código fuente, documentación, y el software están disponibles al público en la página web de United States Geological Service (USGS) (water.usgs.gov/ogw/seawat/).

## 5.3 Geometría y tamaño de celdas

Se utilizó un Modelo Digital de Terreno con un tamaño de celda de 5 m. procesado a partir de curvas de nivel cada 5 metros para lo zona emergida y la batimetría hasta la cota -100 metros para la superficie submarina. Se tomaron en cuenta dos unidades hidroestratigráficas:

**Capa 1:** Formación San Luis (acuífero terciario) localizado encima de la formación San Andrés de acuerdo al límite PMAS (1999) con un espesor máximo de 20m sobre la línea de costa y manteniendo este espesor costa afuera.

**Capa 2:** Formación San Andrés (acuífero terciario) que alcanza profundidades hasta de 200m bajo el nivel del mar, el límite es el basamento ubicado a 200m bajo el nivel del mar.

En la Figura 48 se muestra una vista tridimensional del modelo, se diferencian las formaciones a nivel superficial, la línea de costa esta representada por la línea en color blanco. Se puede observar que la batimetría presenta mayores pendientes en la zona occidental y suroriental respecto a las zonas Norte y Nororiental.

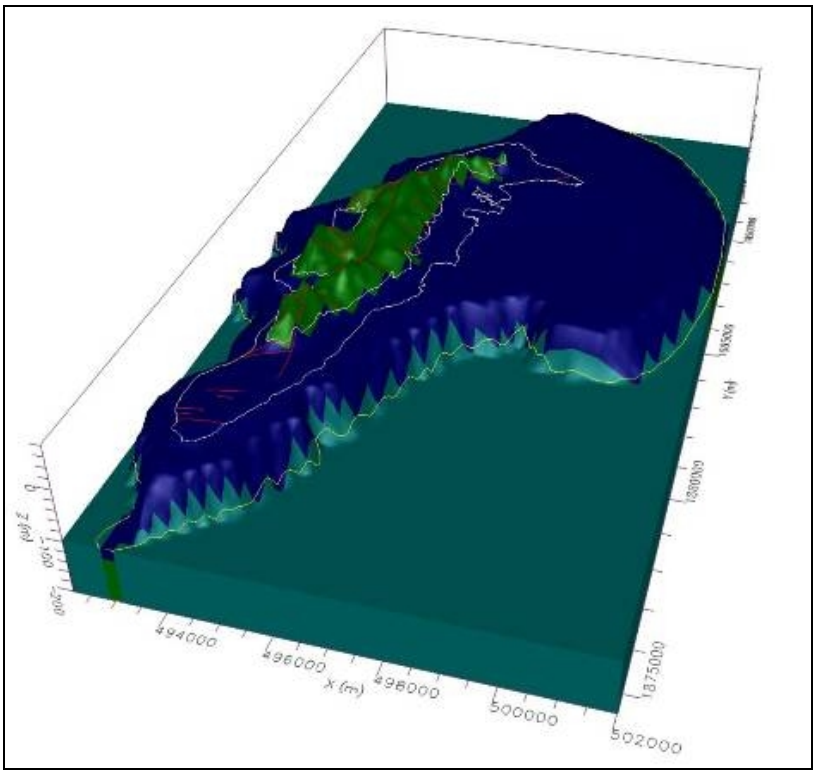


Figura 48. Vista tridimensional del modelo numérico, incluyendo profundidades batimétricas. En verde las zonas correspondientes a la formación San Andrés (Tomado de "Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático")

Respecto a la configuración de la malla inicialmente, se tomaron celdas de 100 x 100 m, y se asignó el basamento ígneo a 200m bajo el nivel del mar. Se implementó una discretización de capas a nivel vertical para asignar condiciones iniciales de sal que definen el lente de agua dulce. Para el acuífero San Luís, dentro del modelo, se importaron las elevaciones del piso teniendo en cuenta un espesor máximo de 20 m. en la línea de costa, generando una capa de espesor y pendiente variable; las 15 capas bajo la formación se configuraron siguiendo las pendientes de la formación San Luís (variable a lo largo del dominio). Al hacer pruebas sobre el modelo con este arreglo, se encontraron incongruencias en los resultados a nivel de cabezas, atribuibles a la pérdida de comunicación de celdas a nivel vertical, dadas las variaciones topográficas del techo de los acuíferos y el poco espesor de la capa de la Formación San Luís. Por ello se implementó una simplificación consistente en establecer un fondo general a 20m bajo el nivel del mar (m.b.n.m.) para generar 10 capas sin pendiente a nivel vertical bajo ésta. Las diferencias entre las formaciones Tsl y Tsa consisten entonces en las propiedades atribuidas posteriormente. Este arreglo arrojó mejores resultados y es la configuración geométrica implementada para el estado estacionario. Posteriormente se refinó la

malla en la zona del Cove para una mejor ubicación de los pozos profundos de esta zona. Se definió condición de no flujo para las celdas fuera del límite batimétrico de los -100 m.b.n.m.

## 5.4 Condiciones de frontera

Se asignó una condición de frontera de cabeza constante perimetralmente a la isla. Esta es la condición hidráulica de frontera más importante en cualquier modelo de acuífero costero o insular, ya que controla el nivel base del acuífero y el equilibrio que deben darse entre los flujos de agua dulce y agua marina. Se dio un atributo de cabeza igual a 0 (nivel del mar a nivel local), a las celdas comprendidas entre la línea de costa y el límite batimétrico de -100m bajo el nivel del mar.

## 5.5 Conductividad

Con base en las de pruebas de bombeo realizadas en el acuífero se diseñaron varios zonificaciones para esta variable y se simularon estos valores en un modelo inicial. Para el modelo inicial durante el proyecto se supuso una zona de alta conductividad a lo largo de la falla del Cove y únicamente sobre la zona de afloramiento de la formación San Andrés; sin embargo el segundo modelo presentado en este trabajo supone zonas de alta conductividad a lo largo de las fallas San Andrés y Cove, incluso por debajo de la formación San Luís, y en las zonas de lineamientos geológicos. La zonificación de la conductividad se presenta a continuación y se muestra en la Figura 49.

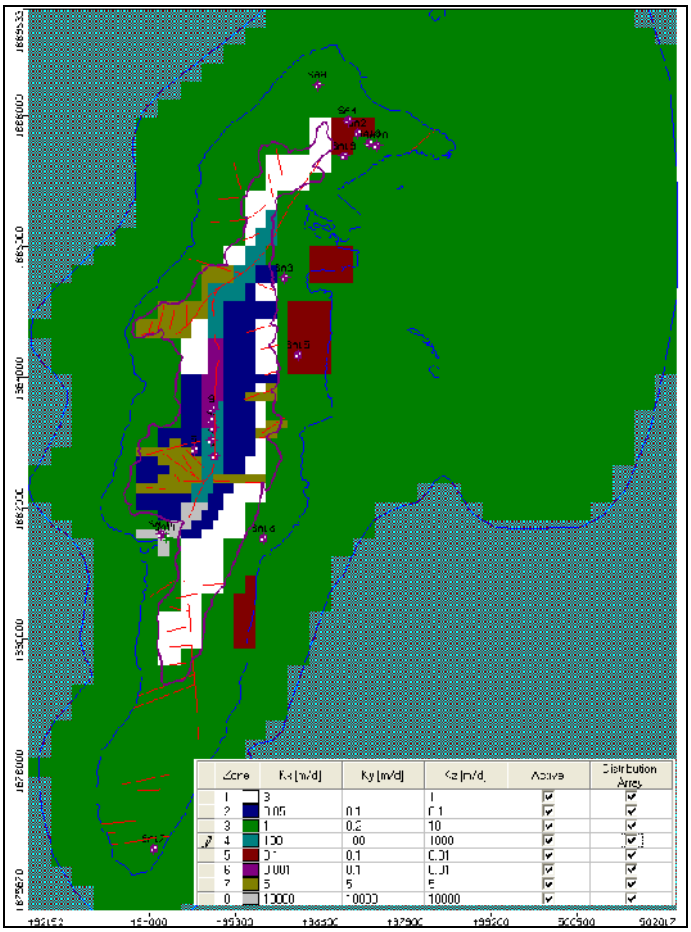


Figura 49. Zonificación de la conductividad hidráulica

***Zona parte alta cuenca del Cove***: Según lo observado se presentan menores conductividades respecto a la sureste, se asignan valores de horizontales 0.05 m/d y verticales de 0.1 (zona 2 color azul oscuro)

***Zona colinas formación San Andrés:*** Según estimaciones de campo se encuentran mayores conductividades en esta zona, se asignan valores horizontales 3 m/d y verticales de 1 m/d (zona 1 color blanco)

***Zonas Falla del Cove y Falla San Andrés***: es la zona de mayor conductividad, se asignan valores desde 100 m/d (zona verde claro) hasta valores de 10.000 m/d (zona gris), aumentando en el sentido del la dirección de flujo.

***Zona Acuífero San Luis***: Dado que no se posee información suficiente se asigna el valor estimado por Piñeros y Lemoine (1987) en su modelo para esta zona (0.1 m/d a nivel horizontal y 0.001 a nivel vertical, zona 3 color verde)

## 5.6 Otros parámetros

Los principales parámetros y las unidades utilizadas para la implementación del modelo numérico se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros y unidades utilizadas en la implementación del modelo numérico

| **Parámetro** | | **Símbolo** | **Valor** | **Unidades** |
|---|---|---|---|---|
| Geometría | Largo Máximo | L | 12000 | m |
| | Ancho Máximo | B | 3000 | m |
| | Elevación del Basamento | d | -200 | msnm |
| Propiedades de la malla | Tamaño Fila | $\Delta x$ | 100 | m |
| | Tamaño Columnas | $\Delta y$ | 100 | m |
| | Espesor Capas | $\Delta z$ | 20 | m |
| | Tipo capa (Libre-confinada) | | Libre | |
| | Unidad de Tiempo | t | Dia | d |
| Características del acuífero | Conductividad Horizontal | Kx | zonificada | m/d |
| | Conductividad Transversal | Ky | zonificada | m/d |
| | Conductividad Vertical | Kz | zonificada | m/d |
| | Densidad agua dulce | $\rho_d$ | 1000 | $kg/m^3$ |
| | Densidad agua salada | $\rho_s$ | 1025 | $kg/m^3$ |
| | Almacenamiento específico | Ss | 1.00E-05 | 1/m |
| | Rendimiento específico | Sy | 0.05 | |
| | Porosidad Específica | ne | 0.3 | |
| | Porosidad Total | nt | 0.4 | |
| | Dispersión longitudinal | D | 20 | |
| | Relación Dispersión. Long./ Disp. Transv. | $\alpha v$ | 0.1 | |
| | Relación Dispersión. Long./ Disp. Vert. | $\alpha t$ | 0.001 | |
| | Coeficiente de difusión | Dm | 0 | $m^2/d$ |
| Condiciones de frontera | Cabezas Iniciales | $h_0$ | 10% de la cota | m |
| | Recarga | R | zonificada | m/d |
| | Cabeza del Mar | Hmar | 0 | m |
| | Flujo másico de sal | Cmar | 35000 | mg/l |

| Parámetro | | Símbolo | Valor | Unidades |
|---|---|---|---|---|
| | Concentraciones iniciales | | zonificada | mg/l |

## 5.7 Calibración en estado permanente

Con la calibración del modelo en estado permanente se busca, con una serie de ajustes, definir el valor de diferentes parámetros, de manera que se logre reproducir, con margen aceptable las condiciones de cabezas piezométricas dadas. Para esta simulación se usaron los datos piezométricos más antiguos disponibles, es decir los reportados por Planhidro (1974), para el acuífero San Andrés en la zona del Cove y los reportados por Diezzman (1957) (mencionados en capítulos anteriores) para el acuífero San Luís. En la Tabla 13 se muestran las cotas en metros sobre el nivel del mar y las coordenadas planas de los pozos utilizados

Tabla 13. Niveles de cabeza piezométricas usadas para la calibración en estado transitorio

| Pozo | Este (m) | Norte (m) | Cota (msnm) | Fondo (msnm) | Prof. (m) | Dia | H obs(m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P4 | 494979.5 | 1882798.1 | 20.72 | -25.7 | 46.5 | 365 | 2.08 |
| P5 | 494677.6 | 1882893.1 | 36.53 | -17.9 | 54.5 | 365 | 4.5 |
| P6 | 494930.5 | 1883038.7 | 24.18 | -30.8 | 55.0 | 365 | 1.6 |
| P7 | 494961.5 | 1883224.3 | 31.94 | -23.5 | 55.5 | 365 | 4.5 |
| P8 | 494924.7 | 1883342.0 | 26.94 | -24.0 | 51.0 | 365 | 8.6 |
| P9 | 494957.4 | 1883512.0 | 28.98 | -14.0 | 43.0 | 365 | 8.3 |
| SA2 | 497169.0 | 1887738.6 | 2.18 | -0.8 | 3.0 | 365 | 0.79 |
| SA3 | 496052.6 | 1885518.8 | 4.26 | 1.4 | 2.8 | 365 | 3.26 |
| SA4 | 497023.9 | 1887923.4 | 3.08 | 1.9 | 1.2 | 365 | 2.21 |
| SA8 | 496557.7 | 1888458.8 | 5.57 | 1.8 | 3.7 | 365 | 2.09 |
| SA9 | 496137.5 | 1887495.9 | 8.54 | 5.5 | 3.0 | 365 | 8.54 |
| SA10 | 494173.0 | 1881599.2 | 2.27 | -1.2 | 3.5 | 365 | 1.32 |
| SA11 | 494252.5 | 1881554.0 | 3.59 | 0.5 | 3.0 | 365 | 0.89 |
| SA15 | 496248.8 | 1884341.0 | 3.45 | 1.0 | 2.4 | 365 | 2.65 |
| SA16 | 495727.3 | 1881538.1 | 2.81 | 0.0 | 2.8 | 365 | 0.23 |
| SA17 | 494063.4 | 1876805.6 | 2.91 | 1.4 | 1.5 | 365 | 1.71 |
| SA18 | 497338.7 | 1887578.9 | 0.96 | -0.7 | 1.7 | 365 | -0.34 |
| SA19 | 496955.5 | 1887381.8 | 3.2 | 1.1 | 2.1 | 365 | 1.46 |
| SA20 | 497451.0 | 1887542.9 | 0.15 | -1.0 | 1.2 | 365 | -0.47 |

Los resultados de la calibración en estado permanente, con la suposición de zonas de alta conductividad a lo largo las fallas y las zonas de lineamiento, presentan un resultado muy similar al

obtenido en el proyecto. Sin embargo se observa que se presenta una mejor correlación de los datos simulados y la disminución del error medio de estimación. En la Figura 50 se muestran los resultados de la calibración y en Tabla 14 se comparan los parámetros de calibración de ambos modelos.

De otro lado en la Figura 51 se observa que la profundidad de la interfase agua dulce- agua salada es variable y menos profunda en zonas donde el nivel piezométrico es mas bajo, esto explicado por que se parte de la hipótesis de Ghyben-Herzbeg para asignar las condiciones iniciales de salinidad en el modelo. El lente de agua dulce (zona en azul), presenta una zona de mezcla o de transición con el agua marina (zona en color marrón). Este es un comportamiento general en la isla, presentándose mayores profundidades de la interfase en la cuenca del Cove respecto a la profundidad de la interfase en la zona norte de la isla.

Tabla 14. Comparación de los parámetros de calibración del modelo numérico en estado permanente

| **Parámetro** | **Valor 1** | **Valor 2** |
|---|---|---|
| Máximo residual (m) | 1.848 | -1.487 |
| Mínimo residual (m) | 0.04 | 0.03 |
| Media residual (m) | -0.036 | -0.087 |
| Media absoluta residual (m) | 0.911 | 0.675 |
| Error estándar de estimación (m) | 0.25 | 0.195 |
| RMS (m) | 1.03 | 0. 807 |
| RMS Normalizado (%) | 11.36 | 8.897 |
| Coeficiente de correlación | 0.908 | 0.95 |

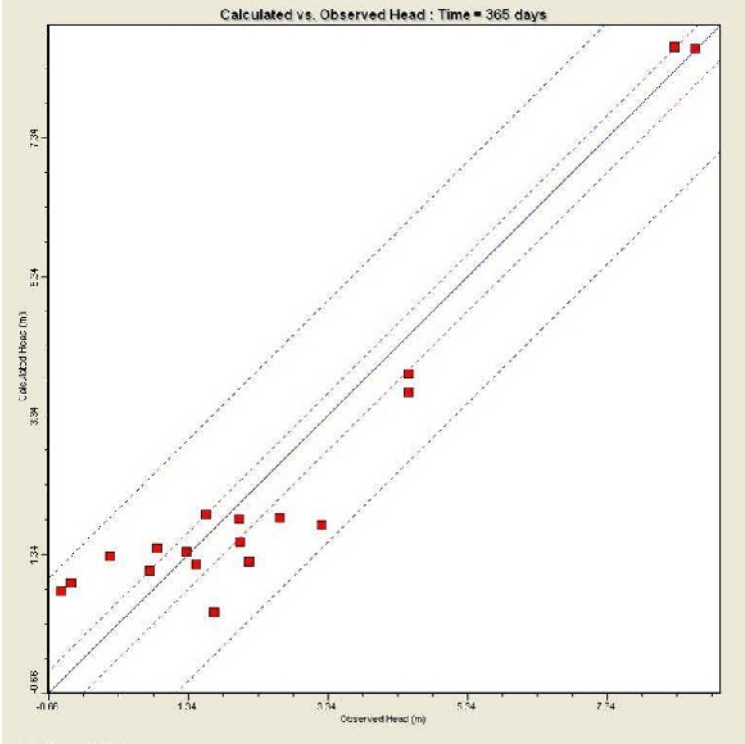


Figura 50. Resultados de la calibración en estado permanente

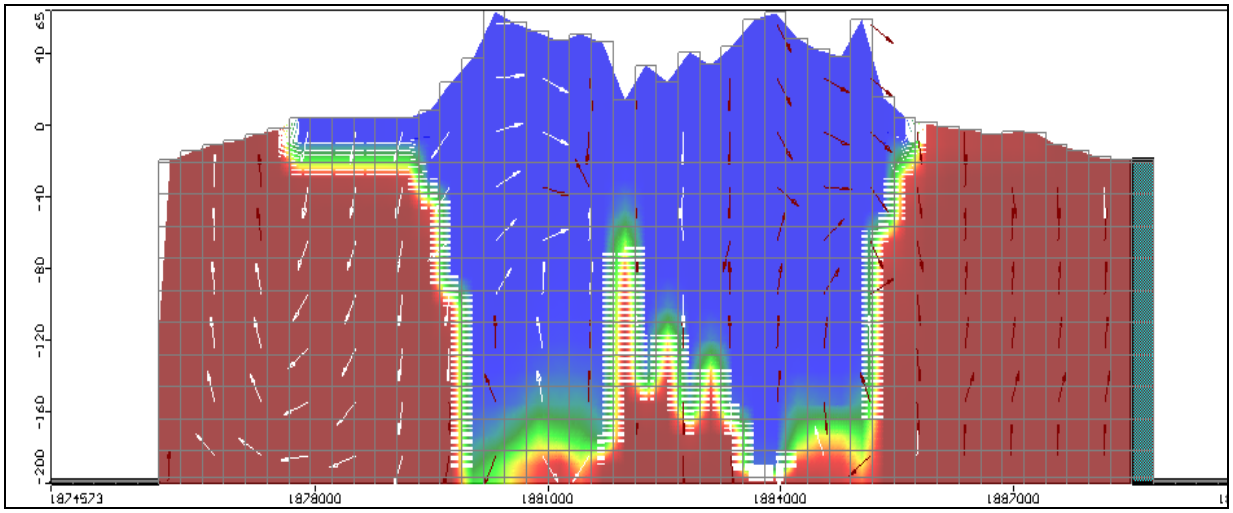


Figura 51. Vista en perfil de distribución de cloruros en la vertical en un perfil esquemático N-S

## 5.8 Calibración en estado transitorio

Para la calibración en estado transitorio se utilizaron las cabezas obtenidas de la calibración en estado permanente, como las condiciones iniciales de la corrida en estado transitorio. Las

concentraciones iniciales son también las provenientes del estado permanente. La información más confiable para este objetivo es la disponible para el período 2007-2008 suministrada por PROACTIVA en los pozos activos 3, 4, 6, 7, 8, 10, 13, 14, 15, 15A, 23, 25, 27. Igualmente, se utilizó información de la red de piezometría Norte para complementar la información de esta parte de la isla, durante el ciclo de calibración.

Dado que se estaba trabajando con una malla de 100x100m en el estado permanente, al establecer los pozos de captación en la zona del Cove permitía varios pozos dentro de una misma celda. Por ello, se refinó la malla en esta zona para ubicar correctamente los pozos del campo de explotación y así evitar incongruencias y celdas secas. Esta refinación se hizo gradualmente desde celdas de 50x50m hasta definir celdas de 25x25m en la zona del Cove. Fue necesario correr el modelo de nuevo en estado permanente con la malla rediseñada para ingresar las condiciones iniciales bajo la misma configuración al estado transitorio. Los períodos de estrés asignados fueron los mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15. Asignación de los períodos de estrés

| | | |
|---|---|---|
| Período de estrés 1 | Día 0 a Día 147 | Época Seca |
| Período de estrés 2 | Día 148 a Día 365 | Época Húmeda |
| Período de estrés 3 | Día 365 a Día 515 | Época Seca |
| Período de estrés 4 | Día 515 a Día 731 | Época Húmeda |

La recarga en el período de calibración, se asignó de acuerdo a las estimaciones realizadas en el presente estudio con la metodología de Vélez (2005). Para el año 2007, catalogado como normal, con una precipitación promedio de 1842 mm./año, la recarga representa un 26% de este valor, distribuida en los dos periodos de estrés establecidos y para el año 2008 catalogado como Húmedo, con una precipitación promedio de 2756 mm./año, se asignó un 33% de este valor, distribuidos también en los periodos de estrés. Igualmente, la recarga se distribuyó espacialmente asignando un porcentaje del 70 % del total para el periodo, en la zona de la Cuenca del Cove, un 30% para la zona restante de la Formación San Andrés (Zona Tsa), y una recarga mínima en la formación San Luís (Zona Tsl).

La distribución de conductividades presentada para la calibración en estado permanente no ha permitido obtener una simulación mejor a la obtenida en el proyecto anteriormente desarrollado. Los niveles observados versus los calculados se muestran en la Figura 52; se encuentra un

coeficiente de correlación de 0.921 y un residual máximo de -4.17 m. en el pozo 27 para el segundo periodo de estrés. En general, el modelo sobreestima los niveles en la zona del norte (puntos en parte inferior de la línea), y subestima en algunos pozos en la cuenca del Cove.

En las Figura 53 a Figura 56 , se presentan las superficies piezométricas calculadas al final de los periodos de estrés. Asimismo, se presentan las direcciones de flujo, que corresponden al comportamiento planteado en el modelo conceptual. En general, los niveles piezométricos más altos están asociados a las cotas máximas que delimitan la cuenca, especialmente al Norte de la Cuenca del Cove, en inmediaciones de la falla.

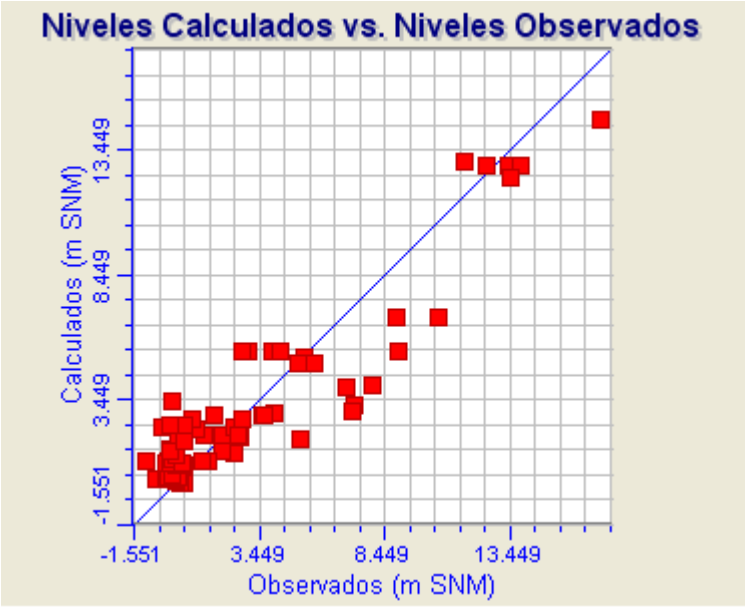


Figura 52. Niveles Observados vs. Calculados para los diferentes periodos de estrés

Tabla 16. Estadísticos de la calibración en estado transitorio

| | |
|---|---|
| Número de datos | 68 |
| Max. Residual | -4.17 (m) en P27 |
| Min. Residual | 0.0009 (m) en P6 |
| Residual Medio | 0.176 (m) |
| Residual Medio Abs. | 1.37 (m) |
| Error estándar de la Estimación | 0.21 (m) |
| Error medio cuadrático | 1.728 (m) |
| EMC normalizado | 9.503 ( % ) |
| Coeficiente de correlación | 0.921 |
| Coeficiente de determinación | 0.84 |

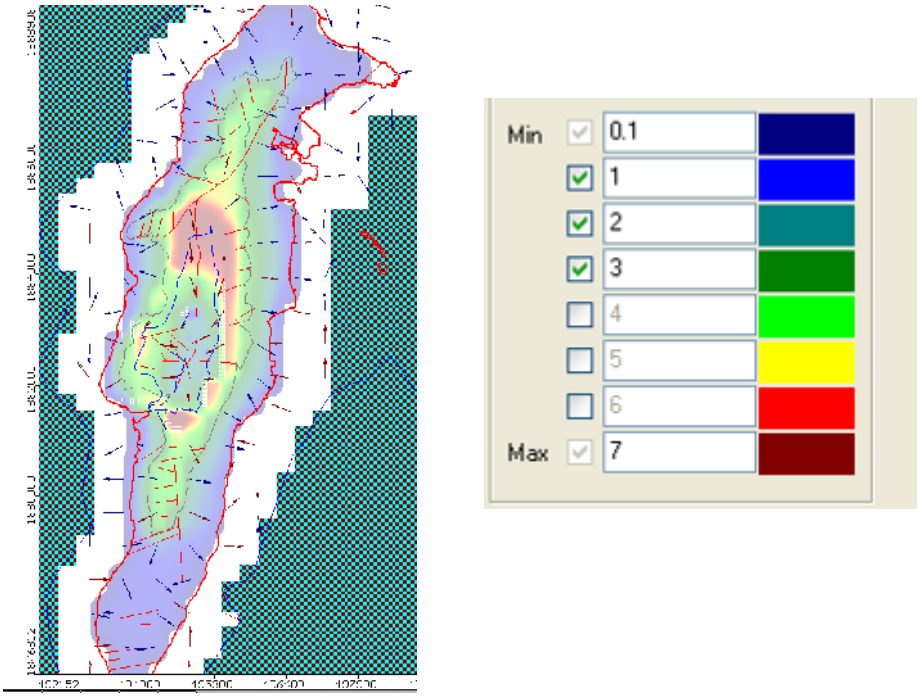


Figura 53. Superficie piezométrica calculada por el modelo para periodo de estrés 1 (147 días)

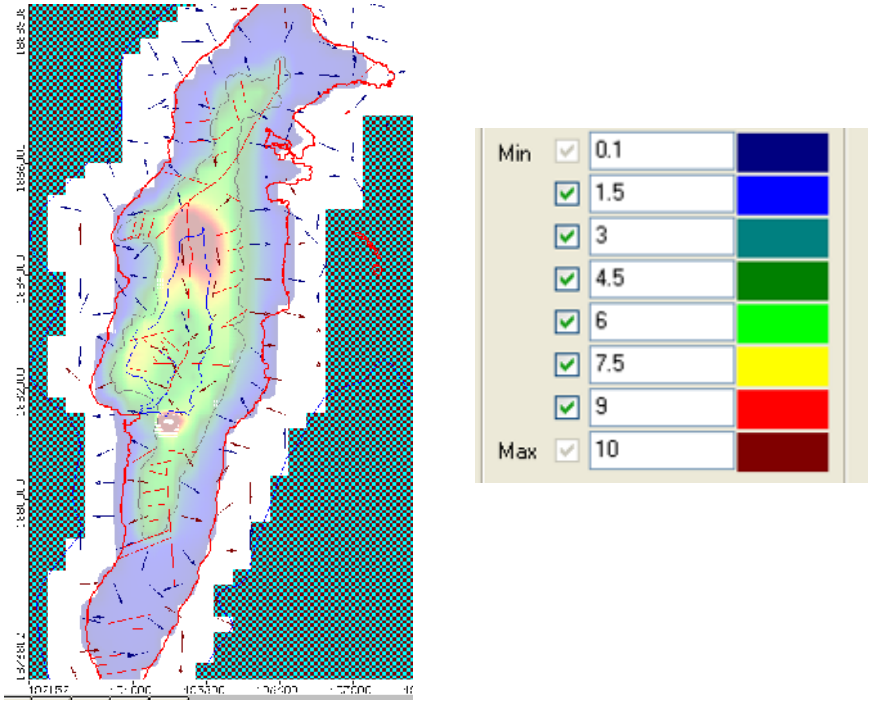


Figura 54. Superficie piezométrica calculada por el modelo para periodo de estrés 2 (365 días)

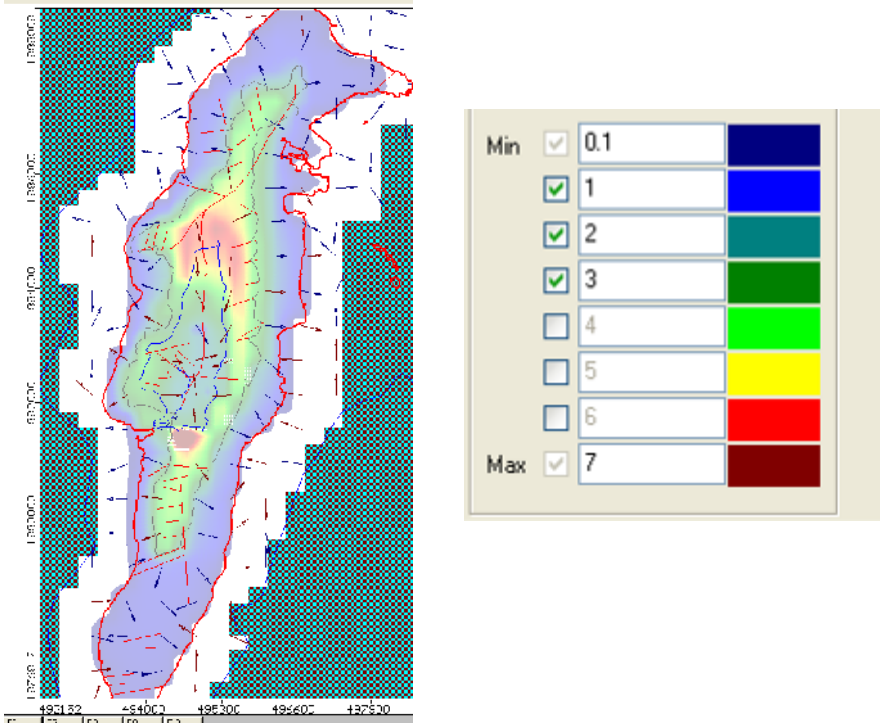


Figura 55. Superficie piezométrica calculada por el modelo para periodo de estrés 3 (515 días)

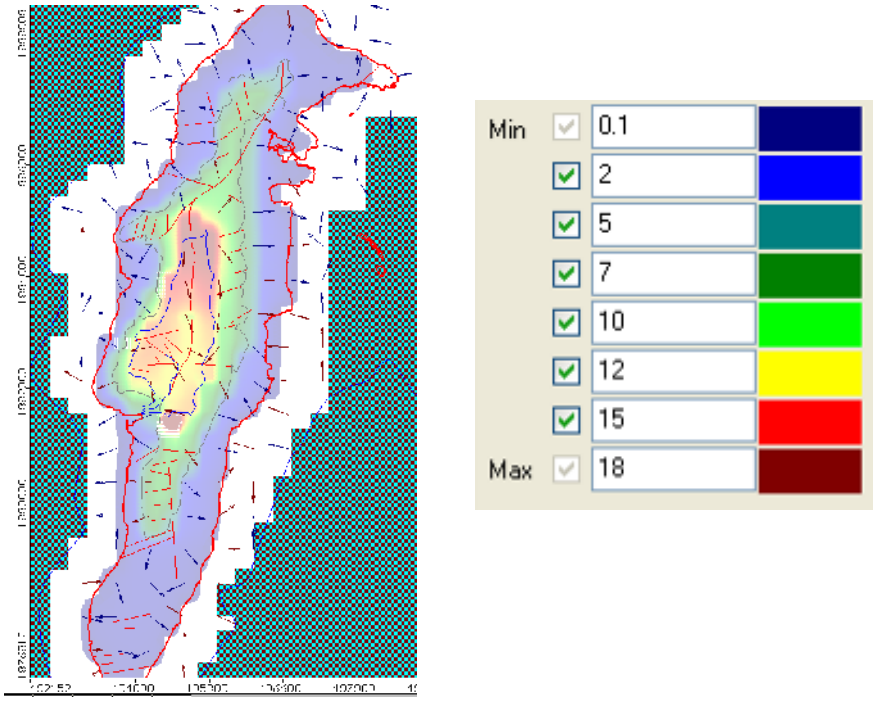


Figura 56. Superficie piezométrica calculada por el modelo para periodo de estrés 4 (731 días)

## 5.9 Escenarios de cambio climático

Debido a las evidencias de cambio climático (discutido en el Capítulo 3) es importante evaluar el comportamiento de su impacto en los sistemas de agua dulce. Para el caso concreto de la isla de San Andrés se establecieron escenarios de cambio climático asociados al aumento o disminución de la precipitación y al aumento de las tasas de explotación del acuífero. Se evaluó el impacto de estas variaciones sobre los niveles piezométricos y sobre la calidad del agua. La elección del umbral de simulación de 12 años corresponde principalmente a la longitud de los datos para realizar la calibración (2 años) y al tiempo de planificación del próximo plan de manejo de aguas (PMAS, 1999) que es de 10 años (2010-2020).

Para analizar los posibles impactos sobre la recarga en la isla de San Andrés, se corrió el modelo numérico implementado, variando la precipitación entre -35% y +35% respecto a un año normal (se evalúa en ambos extremos pues se debe ofrecer un abanico de posibles escenarios a pesar de que el más probable sea el de aumento de la recarga), y la temperatura entre 0 ºC y 5 ºC con respecto a para la condición normal, esta última variable influye en el cálculo de la evapotranspiración potencial. La Tabla 17 muestra los escenarios planteados y el efecto sobre la recarga.

Tabla 17. Escenarios de recarga

| **Tasas de precipitación (% respecto a condición normal)** | **Aumento de temperatura (°C)** | **Recarga estimada (mm/año)** | **Tasa de cambio respecto a recarga normal a 12 años (%)** |
|---|---|---|---|
| -35 | 1 | 147 | -2 |
| -35 | 5 | 130 | -2 |
| -25 | 1 | 245 | -4 |
| -25 | 5 | 186 | -3 |
| -15 | 1 | 320 | -6 |
| -15 | 5 | 312 | -6 |
| +35 | 1 | 821 | +14 |
| +35 | 5 | 750 | +13 |
| +25 | 1 | 650 | +11 |
| +25 | 5 | 420 | -7 |
| +15 | 1 | 560 | +10 |
| +15 | 5 | 540 | +8 |

Con base en los resultados de la Tabla 17 resultados se simuló el impacto sobre el acuífero para una variación de la recarga a tasas de 2.0%, -2.0%, 5.0%, -5.0%, 10.0% y -10% anual. En este primer esquema de escenarios, se partió de los caudales promedio concesionados por CORALINA en la cuenca del Cove  manteniéndolos constantes a lo largo de la simulación.

# 6. Análisis de vulnerabilidad

## 6.1 Introducción

Los acuíferos kársticos son una importante fuente de abastecimiento en muchas regiones en todo el mundo, en las que se presentan actividades industriales, agrícolas y/o forestales que alteran la calidad del agua, es especial durante las temporadas más húmedas del año. Dadas la estructuras de flujo rápido características de los karst, estos acuíferos son generalmente sensibles a las actividades humanas y por tanto considerados vulnerables a la contaminación.

El término vulnerabilidad fue usado por primera vez en los años sesenta en Francia e introducido en la literatura científica por Albinet y Margat (1970). A partir de entonces el concepto de vulnerabilidad ha evolucionado hasta concluir que, la vulnerabilidad intrínseca representa las características geológicas e hidrogeológicas que determinan la sensibilidad del acuífero a la contaminación por actividades humana (Doerfliger, 1998). Según Foster e Hirata (1988), Adams y Foster (1992) y Robins et al. (1994), la vulnerabilidad en acuíferos es una función de las propiedades naturales de las capas de suelo y roca de la zona no saturada y el peligro a la contaminación en un acuífero depende de la vulnerabilidad del acuífero y de la carga de contaminantes a la que está expuesto.

Se debe diferenciar la vulnerabilidad intrínseca, que considera todo tipo de contaminantes, de la vulnerabilidad específica. Ésta última es definida para un determinado contaminante con características particulares, lo cual la diferencia para un contaminante u otro. La evaluación de la vulnerabilidad específica requiere considerar las características del acuífero respecto a cada tipo de contaminante y el contaminante en sí mismo, adicionalmente a las características geológicas e hidrogeológicas intrínsecas del mismo. Sin embargo si el propósito general es la evaluación de un contaminante específico, la vulnerabilidad intríseca juega un papel importante para la definición de zonas de protección.

Esta vulnerabilidad está explicada principalmente por la estructura kárstica altamente heterogénea, en donde se presentan por un lado recarga difusa y recarga directa y por el otro zonas de alta permeabilidad asociadas a conductos subsuperficiales y bajas permeabilidades en los bloques de roca no karstificada (Doerfliger, 1998). Esta dualidad se manifiesta en características muy particulares como grandes descargas de manantiales asociadas a infiltración directa de fuentes superficiales, donde la filtración y la purificación no tienen tiempo de presentase como ocurre en acuíferos de medios porosos. Dado este comportamiento los acuíferos kársticos merecen especial atención y metodologías no convencionales para el análisis de vulnerabilidad.

Los pozos y manantiales ubicados en un acuífero kárstico son en principio altamente vulnerables si existen una red de conductos y un epikarst bien desarrollados conectados entre si. La vulnerabilidad disminuye a partir de la disminución de interconexión entre estos sistemas o de la disminución del grado de desarrollo de los mismos. Por esta razón el análisis de vulnerabilidad no puede obtenerse de la evaluación de un solo parámetro y en general las metodologías más utilizadas involucran parámetros como la protección de las capas de la zona no saturada, las condiciones de infiltración, las características del epikarts, la identificación de redes de drenaje, la distribución espacial de la lluvia, la pendiente del terreno y la vegetación.

Para la isla de San Andrés INGEOMINAS (PMAS, 1999) elaboró el mapa de vulnerabilidad presentado en la Figura 57 donde se observa que la vulnerabilidad más alta se encuentra asociada a la formación San Luís.

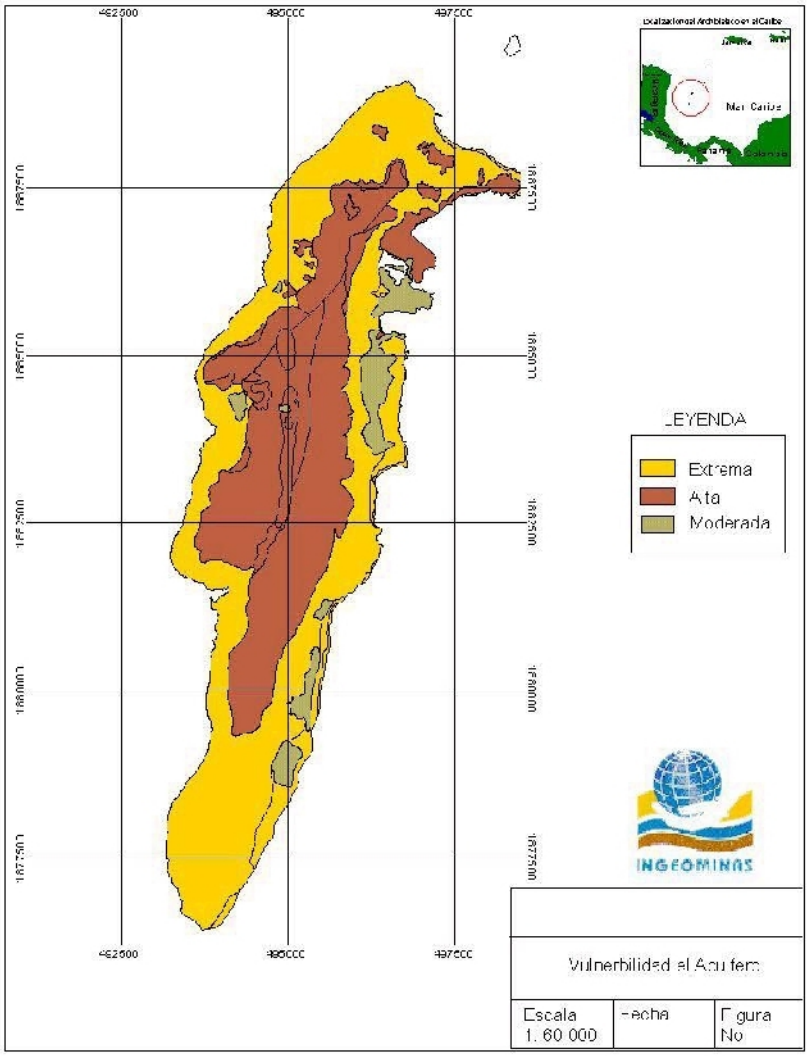


Figura 57. Mapa de vulnerabilidad intríseca INGEOMINAS (PMAS, 1999)

Este capítulo está dedicado a la descripción y aplicación de dos métodos diseñados especialmente para el estudio de vulnerabilidad en acuíferos kársticos: el método EPIK (Doerfliger, 1999) y COP (Vías et al., 2006), así como la comparación con el mapa actual.

## 6.2 Método EPIK

### 6.2.1 Generalidades

EPIK es un método multiparámetrico desarrollado por el Centro de Hidrología de la Universidad de Neuchâtel, Suiza, en un esfuerzo por cartografiar la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos

kársticos. EPIK se basa en la dinámica específica de estas formaciones, representada en cuatro parámetros: desarrollo del epikarts (E), efectividad de la capa protectora (P), condiciones de infiltración (I) y desarrollo de la red de conductos kársticos (K). El método ha sido aplicado en diferentes estudios piloto en varias regiones de Suiza donde el agua subterránea es contaminada principalmente por actividades agrícolas.

El método se implementa en cuatro etapas:

- **Definición de fronteras:** identificación de las fronteras de la cuenca del manantial o del pozo en estudio a partir de la geología, la hidrogeología y los trazadores.

- **Evaluación semicuantitativa y cartografía de los cuatro parámetros:** en esta etapa se evalúa cada parámetro mediante la asignación en un rango de categorías que varía entre 1 y 4. Esta evaluación semicuantitativa se lleva a cabo con la ayuda de metodologías directas e indirectas, incluidos trazadores, geofísica, estudios geomorfológicos, análisis de hidrógrafas, pruebas de bombeo.

- **Cálculo del índice de protección F:** se asigna un valor de categoría para cada parámetro y se modifica mediante un factor de peso de acuerdo a la importancia del parámetro en la evaluación de vulnerabilidad. Se obtiene entonces una representación cartográfica de F

- **Delineación de las zonas de protección:** los valores de F pueden ser clasificados en rangos que definen zonas de protección $S_1$, $S_2$ y $S_3$.

Evaluación de los parámetros E, P, I y K

#### 6.2.1.1 Epikarst (E)

La caracterización del epikarst se hace de manera indirecta a partir del estudio del paisaje kárstico debido a que las características geológicas e hidrogeológicas son poco conocidas y no existe una clasificación real o herramientas de investigación que permitan el reconocimiento de diferentes clases de epikarst; por esta razón una aproximación adecuada para superar esta dificultad es obtener de manera indirecta, a partir de la geomorfología, la caracterización del epikarst. El parámetro E se subdivide en tres categorías, indicando la disminución de la vulnerabilidad.

- **Categoría 1 ($E_1$):** indica la situación más desfavorable en términos de vulnerabilidad. Está asociado a la presencia de sumideros y depresiones con entrada directa de agua, incluyendo dolinas y afloramientos rocosos intensamente fracturados.

- **Categoría 2 ($E_2$):** incluye zonas intermedias entre campos de dolinas y valles áridos. Afloramientos de roca con fracturamiento moderado.

- **Categoría 3 ($E_3$):** incluye el resto de las zonas que no presentan geomorfología kárstica. Formaciones con baja densidad de fracturamiento.

#### 6.2.1.2 Capa de protección (P)

La capa protectora incluye el suelo procedente de la meteorización y otras formaciones geológicas que cubran el acuífero kárstico, como depósitos del Cuaternario o formaciones pre-Cuaternarias no kársticas (Doerfliger, 1998). Dado que generalmente no se tiene información acerca de la textura, contenido de materia orgánica o conductividad hidráulica, para la evaluación de vulnerabilidad este método considera solamente el espesor de la capa de suelo. La clasificación del parámetro P se divide en los casos A y B que se diferencian por la presencia o no de una formación geológica de baja permeabilidad subyacente a la capa de suelo. La Figura 58 ilustra el concepto.

**(A) Suelo directamente superpuesto a la formación calcárea**

- **Categoría 1 ($P_1$):** representa un suelo con espesor entre 0 – 20 cm.

- **Categoría 2 ($P_2$):** representa un suelo con espesor entre 20 – 100 cm.

- **Categoría 3 ($P_3$):** representa un suelo con espesor entre 100 – 200 cm.

- **Categoría 4 ($P_4$):** representa un suelo con espesor mayor a 200 cm.

**(B) Suelo superpuesto a una formación de baja permeabilidad**

- **Categoría 1 ($P_1$):** representa un suelo con espesor entre 0 – 20 cm. sobre una capa de baja permeabilidad de espesor menor a 1 m.

- **Categoría 2 ($P_2$):** representa un suelo con espesor entre 20 – 100 cm. sobre una capa de baja permeabilidad con espesor menor a 1 m.

- **Categoría 3 ($P_3$):** representa una combinación entre suelo y formación de baja permeabilidad con espesor mayor a 1 metro.

- **Categoría 4 ($P_4$):** representa una formación subyacente de baja permeabilidad de más de 8 metros de espesor (altamente plástica), o un suelo de más de un metro de espesor sobre una formación de muy baja permeabilidad.

#### 6.2.1.3 Condiciones de infiltración (I)

La evaluación de las condiciones de infiltración se basa en la identificación de zonas de recarga concentrada (sumideros y lecho de ríos perennes o intermitentes), de recarga difusa y de recarga intermedia donde la escorrentía puede ser importante. Esta última está caracterizada por el coeficiente de escorrentía que depende de la pendiente del terreno y del uso del suelo. Con base en la tabla de los coeficiente de escorrentía establecida para Suiza (Sautier, 1984), el límite entre bajo y alto coeficiente de escorrentía varía entre 0.22 para pastos y 0.34 para cultivos. El parámetro I además está diferenciado para zonas por dentro o por fuera de cuencas de sumideros o de su correspondiente corriente; por fuera de estas cuencas, la base de las zonas más pendientes se considera punto colector de aguas superficiales. Ver **Figura 59.**

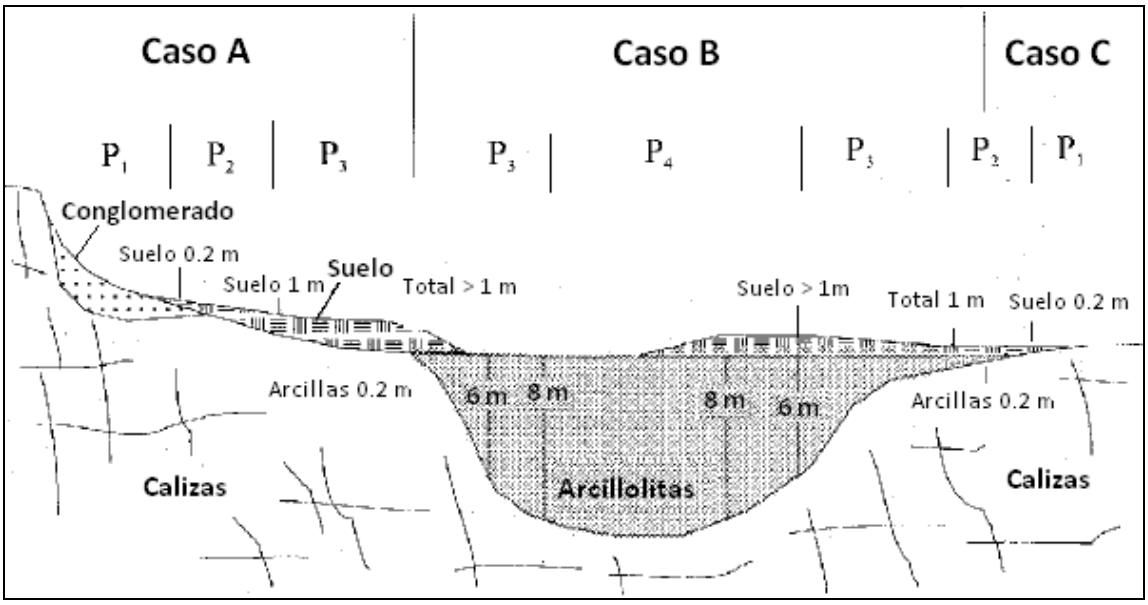


Figura 58. Ilustración de las diferentes formas de cobertura (Doerfliger, 1998)

**(A) Dentro de la cuenca de un sumidero o su correspondiente corriente**

- **Categoría 1 ($I_1$):** corrientes perennes o intermitentes que alimenten un sumidero o una dolina así como la cuenca de la corriente incluyendo sistemas artificiales de drenaje.

- **Categoría 2 ($I_2$):** zonas de la cuenca de la corriente mencionada en la categoría I1 con pendiente mayor al 10% para áreas cultivadas y 25% para prados y pastizales.

- **Categoría 3 ($I_3$):** zonas de la cuenca de la corriente mencionada en la categoría I1 con pendiente menor al 10% para áreas cultivadas y 25% para prados y pastizales.

**(B) Fuera de la cuenca de un sumidero o su correspondiente corriente**

- **Categoría 3 ($I_3$):** representa las áreas en la base de las zonas pendientes donde se recolecta agua de escorrentía, así como la vertiente que alimenta estos puntos (vertientes con alta pendiente)

- **Categoría 4 ($I_4$):** representa el resto de la zona

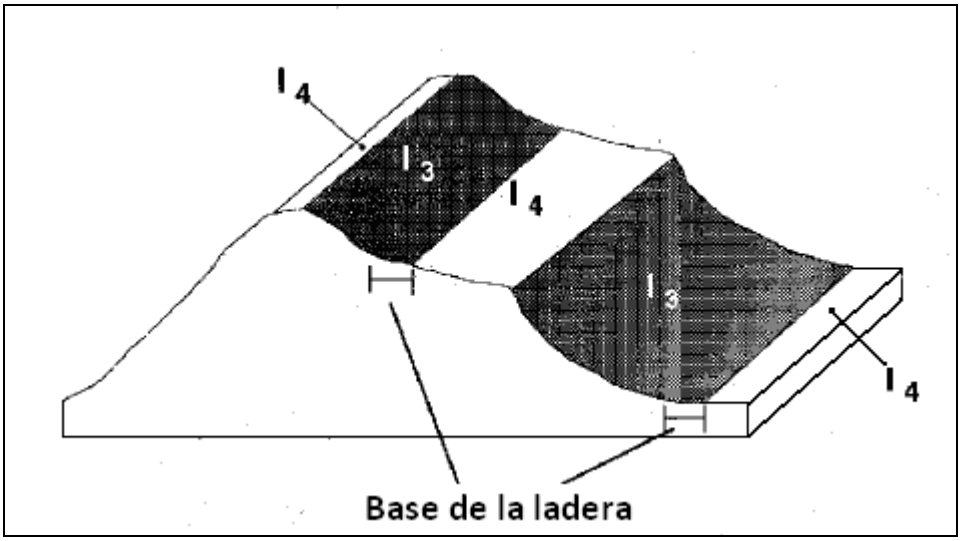


Figura 59. Condiciones de infiltración para zonas por fuera de la cuenca del sumidero. Caso B, método EPIK (Doerfliger, 1998)

#### 6.2.1.4 Red kárstica

La vulnerabilidad es evaluada en términos de la presencia o no de una red de conductos y el grado de desarrollo de la misma. Para determinar la importancia de este sistema respecto a la roca de baja permeabilidad (fisurada o no) se consideran varios indicadores. El primero corresponde a la identificación directa de los componentes de la red, como cavernas, sumideros y conductos activos. En caso de no existir indicadores directos se deben emplear metodologías como análisis de hidrógrafas, trazadores y evaluación de la variabilidad de la calidad de agua.

Las hidrógrafas permiten evaluar el grado de desarrollo de la estructura kárstica dependiendo del tiempo de respuesta del manantial ante un evento de lluvia intenso; si se observa una tasa importante de descarga seguida de una recesión rápida de la curva de caudal se puede inferir la presencia de una red de conductos importante. Igualmente tiempo de viaje relativamente corto en las pruebas de trazadores es un potente indicador de la presencia de la red. De otro lado la estabilidad química y bacteriológica en una descarga de manantial es un indicador de un desarrollo incipiente de la estructura kárstica. Finalmente otro indicador está dado por el número de manantiales presentes en el acuífero; según Mangin (1975), la jerarquía en una red kárstica implica que la presencia de una sola salida de caudal está asociada a un desarrollo importante de los procesos de disolución, mientras que un sistema poco evolucionado presenta múltiples descargas de agua.

El parámetro K se divide en tres categorías

- **Categoría 1 ($K_1$):** moderada a bien desarrollada red de conductos, con diámetros entre decímetros y metro y bien interconectados entre sí.

- **Categoría 2 ($K_2$):** red de conductos poco desarrollada, con diámetros menores a decímetros y poca interconexión.

- **Categoría 3 ($K_3$):** sistemas donde el medio poroso juega un papel importante en la filtración así como formaciones calcáreas fracturadas no karstificadas.

El parámetro K generalmente se aplica por igual para toda el área de estudio, pero puede ser subdividido en zonas según el grado de desarrollo de las mismas.

### 6.2.2 Cálculo del índice de protección F

Los cuatro parámetros descritos anteriormente permiten calcular el parámetro F para toda la zona de estudio, según la ecuación:

$$F = \alpha E_I + \beta P_i + \gamma I_i + \delta K_i$$

Donde F es el índice de protección y α, β, γ y δ son coeficientes de peso para cada parámetro.

El valor de cada categoría usado para el cálculo de F se muestra en la Tabla 18. Los valores más bajos representan vulnerabilidad más alta. De otro lado los valores de los pesos asignados a cada parámetro se muestran en la Tabla 19.

Tabla 18. Valores de categorías E, P, I, K, m

| $E_1$ | $E_2$ | $E_3$ | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $I_1$ | $I_2$ | $I_3$ | $I_4$ | $K_1$ | $K_2$ | $K_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 |

Tabla 19. Pesos asignados según cada parámetro, método EPIK

| **Parámetro** | E | P | I | K |
|---|---|---|---|---|
| **Coeficiente de peso** | α | β | γ | δ |
| **Peso relativo** | 3 | 1 | 3 | 2 |

Las posibles soluciones a la ecuación están en un rango entre 9 y 34, y a su vez estos valores tienen asociado unas zonas de protección que dependen del grado de vulnerabilidad. La muestra en resumen los rangos de clasificación de vulnerabilidad.

Tabla 20. Rangos de clasificación de vulnerabilidad según índice F, método EPIK

| **Vulnerabilidad** | **Índice de protección F** | **Zona de protección S** |
|---|---|---|
| Muy alta | 9 a 19 | S1 |
| Alta | 20 a 25 | S2 |
| Moderada | Mayor a 25 | S3 |

| | | |
|---|---|---|
| Baja | Presencia de P4 | Resto del área |

## 6.3 Método COP

### 6.3.1 Generalidades

El método COP ha sido desarrollado para evaluar y cartografiar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos calcáreos en el marco de la Acción Europea COST 620. El método utiliza los siguientes factores: capacidad de protección de la zona no saturada (O), concentración de flujos en superficie (C) y precipitación (P). El método COP tiene en cuenta características tales como la presencia de sumideros kársticos y su cuenca de alimentación, porque disminuyen la capacidad de protección natural del agua subterránea dada por las capas suprayacentes (factor O). El factor P tiene en cuenta la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, por ser el principal agente que transporta los contaminantes hasta el agua subterránea.

### 6.3.2 Factor O (Overlaying layers)

El factor O considera la protección al acuífero dada por las propiedades físicas y el espesor de las capas suprayacentes  la zona saturada. Este factor involucra dos tipos de capas con importantes funciones hidrogeológicas: el suelo (Os) y la capa litológica de la zona no saturada (Ol). El subfactor suelo representa la actividad biológica del subsuelo, donde se producen procesos importantes de atenuación de la contaminación. Este subfactor involucra varios parámetros: textura, tamaño y distribución del grano y espesor de la capa. De otro lado el subfactor litológico refleja la capacidad de atenuación de cada una de las capas de la zona no saturada, considerando para su cuantificación el tipo de roca y el grado de fractura, el espesor de cada capa y la condición de confinamiento del acuífero. La sucesiva suma de la multiplicación del espesor por el factor de litología genera un índice asociado a la protección. El concepto de adicionar capas se basa en los métodos AVI (Van Stempvoort et al. 1993) y PI (Goldscheider et al. 2000).

El valor del factor O se obtiene de la suma de los subfactores suelo (Os) y litología (Ol). Valores bajos del factor O corresponde a zonas de afloramiento de rocas calcáreas y donde el suelo está pobremente desarrollado. Alta o moderada protección dada por altos valores de O se asocian a suelos o litologías de baja permeabilidad.

### 6.3.3 Factor C (flow Concentration)

El factor C representa el potencial del agua para superar la protección dada por las capas suprayacentes; este potencial considera la concentración de agua proveniente de la escorrentía durante eventos de lluvia infiltrada a través de sumideros, sobrepasando la zona no saturada en poco tiempo. Se pueden diferenciar dos escenarios:

**Escenario 1:** describe la situación dentro de una cuenca cubierta por una capa de baja permeabilidad, donde la escorrentía a través de sumideros o de un área de concentración de flujo, como la base de las laderas. Esto implica que la recarga del acuífero es de forma directa sin atravesar la zona no saturada. El factor C en este escenario considera cuatro variables: la distancia del área de recarga al sumidero (ds) o a la dolina (dl) y la influencia de la vegetación (v) y de la pendiente (s). La vulnerabilidad disminuye con la distancia de la zona de recarga al sumidero.

La evaluación del tipo de cobertura vegetal considera el porcentaje del área de la cuenca más afectada por los procesos de escorrentía – infiltración mientras que la escorrentía aumenta proporcionalmente con la pendiente del terreno. Con la combinación de vegetación y pendiente se obtiene el parámetro sv (slope-vegetation) que da cuenta de la facilidad del agua para alcanzar las zonas de sumideros o áreas de concentración. El factor C se obtiene entonces de la multiplicación del parámetro sv y la distancia del área de recarga bien sea al sumidero (ds) o a la dolina (dh).

**Escenario 2:** representa las zonas donde ocurre infiltración de escorrentía pero no de manera concentrada a través de estructuras kársticas como dolinas o sumideros. Para este escenario se tienen en cuenta tres parámetros: las características superficiales (sf), la pendiente (s) y la vegetación (v).

El parámetro de las características superficiales (sf) considera tanto las estructuras geomorfológicas específicas de acuíferos kársticos como la presencia o ausencia de capas protectoras (permeable o impermeable) que determinan la importancia de los procesos de escorrentía y/o infiltración. La evaluación de la pendiente y vegetación tiene un sentido diferente respecto al escenario 1; en este caso las altas pendientes y la ausencia de vegetación contribuyen a una mayor escorrentía y menor infiltración de agua, ya que no existen sumideros. Para este escenario el factor C se obtiene de la multiplicación del parámetro pendiente-vegetación (sv) y el parámetro sf.

### 6.3.4 Factor P (Precipitation)

Según Daly et al. (2002) este factor involucra tanto la cantidad de lluvia como la influencia de factores que afectan la infiltración como la frecuencia, la distribución temporal, duración e intensidad de tormentas. Estos factores ayudan a determinar la capacidad del agua para transportar contaminantes de la superficie al acuífero. El factor P es evaluado mediante dos parámetros: la cantidad de lluvia (Pq) y la distribución temporal de la lluvia (Pi).

El subfactor Pq describe el efecto de la cantidad de lluvia y la recarga anual en la vulnerabilidad del acuífero; en este caso se toma la media anual de lluvia de los años más húmedos. Muchos métodos consideran que la aumento de la recarga disminuye la protección del acuífero dada una velocidad de infiltración más rápida. De manera inversa, altas tasas de recarga aumentan la disolución de los contaminantes y disminuyen la vulnerabilidad. Se debe tener en cuenta que este modelo considera que cuando las precipitaciones en años húmedos oscilan en un rango entre 800 – 1200 mm/año la vulnerabilidad es mayor respecto a precipitaciones menores dado que el transporte de contaminantes es más importante que el proceso de disolución; sin embargo al exceder este rango, la disolución de contaminantes potenciales es el proceso dominante y por tanto la vulnerabilidad disminuye.

De otro lado el subfactor Pi se relaciona con la distribución de la lluvia en un período determinado de tiempo, a manera de un indicador de la intensidad de la precipitación. Para su estimación se toma la relación entre la media de la precipitación anual de los años húmedos y la cantidad de días lluviosos; altos valores de precipitación y pocos días de lluvia resultan en grandes cantidades de recarga que facilitan la infiltración rápida a través de fracturas o conductos incrementando la vulnerabilidad. Cuando la recarga es difusa y lenta Pi presenta valores bajos.

Finalmente el factor P se obtiene como la suma de los subfactores Pq y Pi. Altos valores de P se asocian a un bajo impacto en la protección de la cobertura (dada por el factor O) debido a la precipitación. De otro lado bajos valores de P aumentan de manera importante el grado de vulnerabilidad del acuífero.

### 6.3.5 Índice COP

El factor COP se obtiene de la combinación de los tres factores, como lo propone la siguiente ecuación:

$$Índice_COP = C \cdot O \cdot P$$

El índice COP es realmente una modificación de los valores del factor O, consistente en la reclasificación de grupos y su correspondiente vulnerabilidad. Las clasificaciones extremas de O se dividen y se reclasifican; los intervalos límite correspondientes a las clases Muy Alta y Alta son asignados dependiendo principalmente de la influencia del factor C en rocas calcáreas y en menor grado del factor P. De igual forma la clase Muy Bajo corresponde a zonas donde C y P tienen poca influencia en la protección. Las clases Moderada y Baja corresponden a zonas donde la protección potencial es en promedio baja y los factores C y P no tienen una influencia decisiva en la vulnerabilidad. La presenta **Figura 60** una tabla resumen para el cálculo y la clasificación de los factores C, O, P y del índice COP.

## 6.4 Aplicación de las metodologías

### 6.4.1 Método EPIK

Para la aplicación del método EPIK se tomaron los mapas correspondientes a litología, suelos, coberturas, pendientes y geomorfología. La definición de las zonas con mayor desarrollo kárstico se hizo con base en los reportes de la literatura respecto a la presencia de dolinas y la densidad de fracturamiento de las zonas de falla, de tal forma que la zona más sensible respecto a los parámetros E y K corresponde a la cuenca del Cove, en la zona de la falla del Cove. La presencia de los depósitos cuaternarios de la formación San Luís brinda una alta protección al acuífero subyacente.

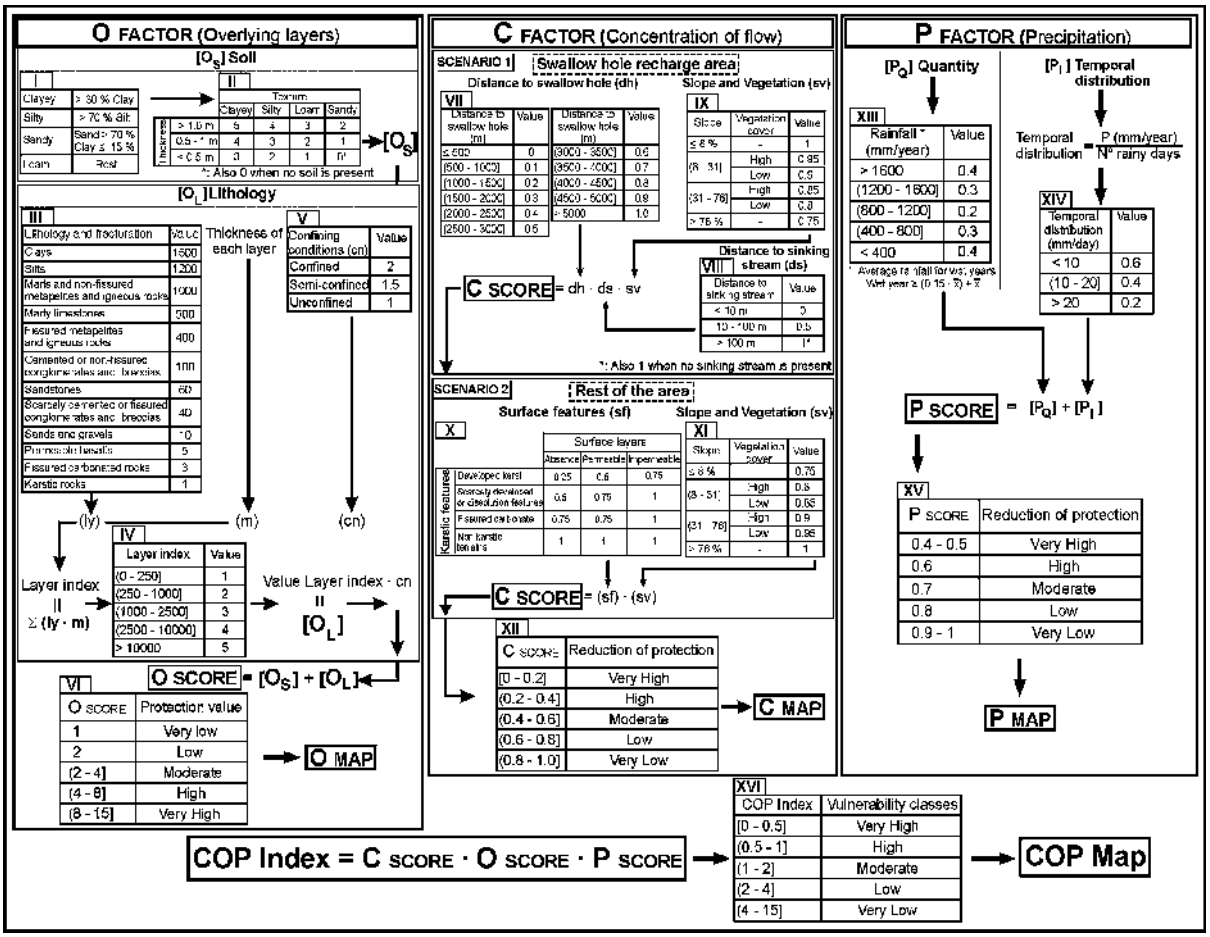


Figura 60. Diagrama del método COP, mostrando la diferenciación de los factores C, P y O (Vías et al., 2006)

De otro lado el parámetro P se estimó a partir del "Estudio detallado de suelos del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina" del IGAC, mientras que el parámetro I a partir del tipo de cobertura y pendientes, ya que en la isla no se presenta una zona de sumidero completamente definida.

En la Figura 61, se muestra el mapa final de vulnerabilidad intrínseca obtenido a partir de dicho método.

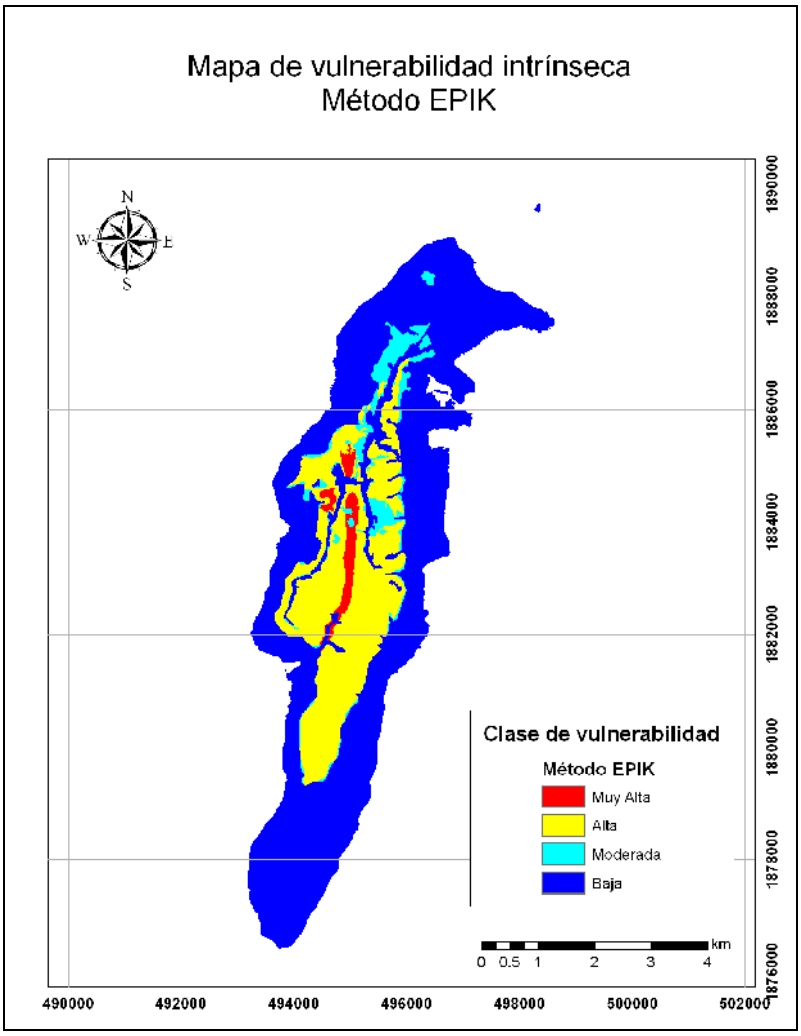


Figura 61. Mapa de vulnerabilidad intrínseca obtenido a partir del método EPIK

De la Figura 61 se observa que la zona más vulnerable a la contaminación se encuentra asociada a la formación San Andrés, dadas las características calcáreas, y en especial la zona de falla, donde existen algunos rasgos de formación kárstica como dolinas. Cabe anotar que dado el poco conocimiento de la geometría y el grado de desarrollo del acuífero kárstico es de vital importancia utilizar metodologías de comportamiento regional para determinar con mayor precisión las zonas potencialmente más vulnerables a la contaminación, como análisis de hidrógrafas, trazadores o isotopía. Sin embargo comparando el mapa de la **Figura 61** con el obtenido por INGEOMINAS (PMAS, 1999), se observan diferencias importantes dado que las zonas de mayor vulnerabilidad se ubican en el afloramiento de la formación San Andrés según el método EPIK, a diferencia del mapa de INGEOMINAS donde las zonas más vulnerables corresponden a la formación San Luís. Esta

observación es muy importante ya que el análisis de vulnerabilidad permite delimitar zonas de protección del acuífero

### 6.4.2 Método COP

Para el método COP se tomaron los mapas de litología, suelos, coberturas, pendientes y los datos anuales de precipitación y días de precipitación. La determinación de las capas de protección que se utilizan para el cálculo del factor O, se hizo a partir del análisis de las perforaciones de pozos presentado en el estudio 'Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático', de donde se obtuvieron diversos cortes geológicos. La zona no saturada se supuso desde la superficie hasta el nivel medio del mar dadas la alta variabilidad de los niveles piezométricos a lo largo del año. De otro lado la textura y granulometría del suelo se obtuvo del "Estudio detallado de suelos del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina". En la Figura 62 se muestra el mapa de vulnerabilidad obtenido por el método COP.

De la Figura 62 se observa que como en el método EPIK las zonas más vulnerables a la contaminación dadas por el método COP se encuentran igualmente en la formación San Andrés; sin embargo dada la textura arcillosa de los suelos el factor de protección para el método COP disminuye el grado de vulnerabilidad de Alta a Moderado, en comparación al EPIK, en el que el factor asociado a la protección es el menos influyente.

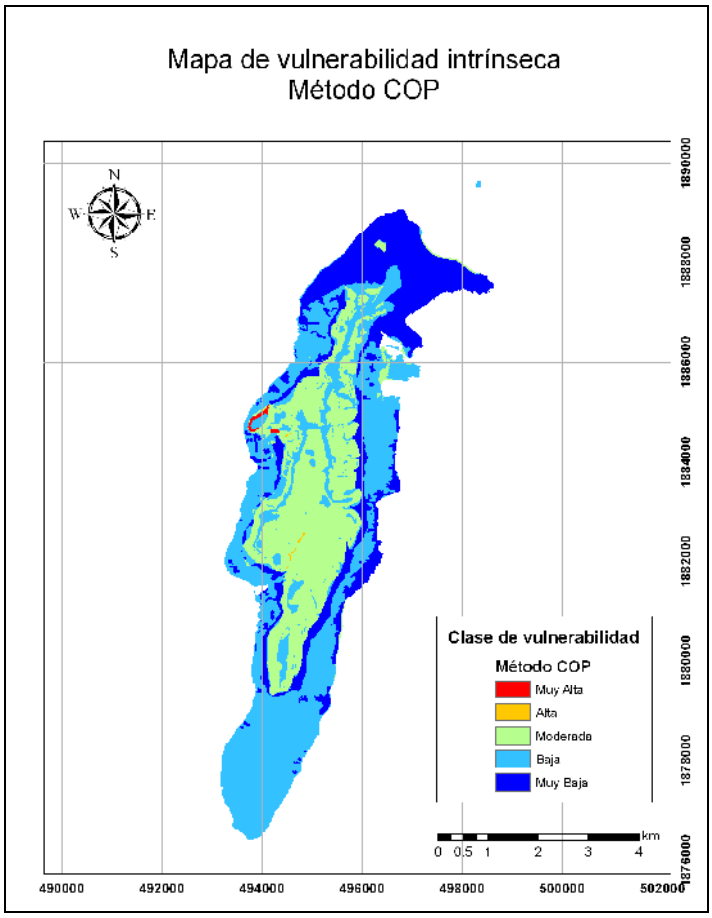


Figura 62. Mapa de vulnerabilidad intrínseca obtenido a partir del método COP

# 7. Análisis de demanda

## 7.1 Introducción

Durante el proyecto “Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático” se realizó el análisis de demanda y oferta hídrica de la isla de San Andrés a partir de la exploración y comparación de estudios realizados, la proyección poblacional, las expectativas de turismo y las fuentes de abastecimiento.

A partir de los datos del SUI (Sistema Único de Información de Servicios Públicos), asociados a la empresa prestadora de servicios públicos de la isla, PROACTIVA Aguas de Archipiélago S.A. E.S.P. se realizó un análisis histórico de la composición de la demanda.

Igualmente se presenta el análisis de escenarios futuros de demanda, tomando en cuenta las proyecciones de población residencial y turística y las metas de reducción del Índice de Agua No Contabilizada (IANC) y de la dotación.

## 7.2 Definiciones

***Demanda Hídrica:*** Es la cantidad de agua necesaria para satisfacer los requerimientos de una cierta población o grupo de usuarios.

***Oferta Hídrica:*** Es la cantidad de agua disponible en una cuenca que se podría utilizar para atender la demanda.

***Dotación:*** Es la cantidad mínima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante.

***Captación:*** Es una estructura destinada a captar o extraer el caudal requerido por un sistema de abastecimiento.

***Vertimiento:*** Es una estructura o mecanismo mediante el cual el agua es devuelta a la red de drenaje o al suelo después de su utilización (aguas servidas) o también cuando se trata de aguas lluvias.

## 7.3 Revisión de información

Se realizó una revisión de la información relacionada con la estimación de la demanda hídrica en la isla, tanto residencial como de los sectores industrial, turístico, comercial y de servicios. Entre la información revisada se tienen los datos censales, la información sobre consumos del Sistema Único de Información de Servicios Públicos y estudios realizados por entidades para estimar y proyectar la demanda hídrica de la isla.

### 7.3.1 Plan de desarrollo 2008 – 2011

En el plan de desarrollo del departamento se presenta el diagnóstico de la capacidad instalada de abastecimiento de agua, 41 l/s proveniente de pozos de agua dulce y 47 l/s de agua desalinizada. Se resalta que el sistema está compuesto por redes de aducción-captación, la plata de ablandamiento del agua subterránea, las redes de conducción, los tanques de almacenamiento, las redes de distribución y la planta desalinizadora.

Como dato importante en cuanto a la prestación del servicio público de acueducto se presenta un reporte de la continuidad de la prestación del servicio en la isla (Tabla 21).

Tabla 21. Continuidad del servicio de acueducto en la isla de San Andrés

| SECTOR | SUBSECTOR | Día servicio/mes | Frecuencia prestación servicio |
|---|---|---|---|
| | Centro hotelero | 30 | Todos los días |
| | Centro Residencial | 8 | Cada 4 días |
| | Sarie Bay | 30 | Todos los días |
| | Almendros | 8 | Cada 4 días |
| | Natanias | 8 | |
| | Back Road | 8 | |
| | Norte | 15 | Cada 2días |
| | Sur | 30 | Todos los días |
| | Norte | 4 | Cada 7 días |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | Centro | 4 | |
| | Medio | 4 | |
| | Sur | 4 | |
| | Shingle Hill | 2 | Cada 15 días |
| | Hill Can | 2 | |
| | Court House | 2 | |
| | Orange Hill | 2 | |
| | Simpson Well | 2 | |
| | Corales | 2 | |
| | San Luis Apostadero | 2 | |
| | Perry Hill | 2 | |
| | Back Rally | 2 | |
| | Barkers Hill | 2 | |
| | Misión Hill | 2 | |
| | Flowers Hill | 2 | |
| | Bight Archbold Alto y Bajo | 2 | |
| | 5 de Noviembre | 2 | |
| | Nuevo Bosque | 2 | |
| | Bight Electrosan Alto y Bajo | 2 | |
| | Sagrada Familia | 2 | |
| | Vista hermosa | 2 | |
| | Back Road Alto | 2 | |
| | Atlantico | 2 | |
| | Buenos aires | 2 | |
| | Bolivariano | 2 | |
| | Altos de Natania | 2 | |
| | Pueblo viejo | 2 | |
| | Serrana | 2 | |
| | Lineal Alto y Bajo | 2 | |
| | Paña Hill | 2 | |
| | Bar Costa Rica | 2 | |
| | Schooner Bight | 2 | |
| | Carcel Nueva esperanza | 2 | |
| | Ball Field | 2 | |
| | Little Hill Loma y San Luis | 2 | |
| | Barraca Alto y Bajo | 2 | |

### 7.3.2 Caracterización y modelación del régimen de las aguas subterráneas

En el trabajo denominado “Caracterización y modelación del régimen de las aguas subterráneas” realizado por INGEOMINAS en 1997, se cita el estudio realizado por la firma INGESTUDIOS S.A. (1996), donde se presentan datos de dotaciones de diferentes sectores y se proyecta la demanda

de agua desde el año de 1996 hasta el 2015 (Tabla 22). No se pudo obtener el informe específico de estimación y proyección de la demanda.

Tabla 22. Dotación y proyección de demanda de agua por sectores (INGESTUDIOS S.A., 1996)

| Año | Población residente (150 l/hab/d) | Población flotante (293 l/hab/d) | Establ. Oficiales (3905 l/u/d) | Establ. Comerciales (333 l/u/d) | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| 1996 | 130,40 | 58,80 | 13,02 | 11,52 | 213,74 |
| 2000 | 125,08 | 70,81 | 12,49 | 13,13 | 221,51 |
| 2005 | 129,42 | 91,00 | 12,93 | 16,23 | 249,58 |
| 2010 | 132,42 | 109,34 | 13,22 | 19,03 | 274,01 |
| 2015 | 134,70 | 125,83 | 13,45 | 21,55 | 295,53 |

### 7.3.3 Plan director de acueducto y alcantarillado para San Andrés, Providencia y Santa Catalina al año 2027

Realizado por la firma de ingenieros Ángel & Rodríguez en el año de 1997. En este informe se calculan las proyecciones de población basados en la tasa geométrica dada por el CORPES C.A. en el año de 1992 para el crecimiento de la población en la región del Caribe colombiano, así como un incremento en la población flotante del 3% anual, valor adoptado para ciudades turísticas de la costa Atlántica y al que se hace referencia en estudio del Consorcio Ángel y Rodríguez - INESCO (1993). Además se reporta un Índice de Agua No Contabilizada (IANC) del 35%, tomado del estudio de la firma INGESTUDIOS S.A. (1996) y suponen los valores de dotación mostrados en la Tabla 23**.**

Tabla 23. Dotaciones por tipo de usuario según el estudio de Ángel y Rodríguez, 1996

| Población residencial | Población flotante | Comercial | Oficial |
|---|---|---|---|
| 150 l/hab/d | 293 l/hab/día | 233 l/usuario/d | 3905 l/usuario/d |

Dentro del documento, como fuentes viables de abastecimiento de agua en la isla se contemplan el agua dulce del Valle de Cove y la desalinización. Se reporta un IANC a 1997 del 35%.

### 7.3.4 Plan de Manejo de Aguas Subterráneas (PMAS)

En el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas (PMAS, 1999), formulado por CORALINA en el año 1999 se obtiene la demanda promedio de agua para este año (Tabla 24), asumiendo las proyecciones de población residencial dadas por el DANE (2005) a partir del censo de 1993 y calculando la población flotante con base en los datos de la OCCRE (Oficina de Control de Circulación y Residencia) de 1998 y tomando un tiempo de estadía promedio de 4 días por turista. Los datos correspondientes a los usuarios comerciales y oficiales se tomaron de Cabrales (1992)

Tabla 24. Cálculo de demandas promedio según el PMAS

| Sector | Año proyección | Población (N°. habitantes o usuarios) | Demanda por usuario (litros/día-hab) | Demanda total (m3/día) |
|---|---|---|---|---|
| Residente | 1999 | 79000 | 150 | 11850 |
| Flotante | 1999 | 4550 | 289 | 1315 |
| Comercial | 1999 | 2608 | 233 | 608 |
| Oficial | 1999 | 341 | 3905 | 1332 |
| Agropecuario | 1999 | 5 | 17280 | 86 |

### 7.3.5 Comparación de las proyecciones existentes para la demanda hídrica de la isla

A continuación se presentan los resultados tabulares y gráficos correspondientes a los diferentes tipos de demanda considerados para la isla de San Andrés obtenidos en diferentes estudios (Tabla 25 a Tabla 29).

Tabla 25. Proyección de demanda residencial

| Demanda residencial (l/s) | | | |
|---|---|---|---|
| **Año** | **Ingeominas** | **A & R** | **Coralina** |
| 1997 | 128,8 | 136,81 | N/A |
| 1999 | 123,34 | 138,57 | 137,15 |
| 2005 | 129,42 | 137,87 | N/A |
| 2010 | 132,42 | 135,82 | N/A |

Tabla 26. Proyección de demanda población flotante

| Demanda Pob. Flotante (l/s) | | | |
|---|---|---|---|
| **Año** | **Ingeominas** | **A & R** | **Coralina** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1997 | 62,08 | 46,00 | N/A |
| 1999 | 66,54 | 47,35 | 15,22 |
| 2005 | 91 | 51,18 | N/A |
| 2010 | 109,34 | 54,89 | N/A |

Tabla 27. Proyección de demanda usuarios comerciales

| **Demanda Comercial (l/s)** | | | |
|---|---|---|---|
| **Año** | **Ingeominas** | **A & R** | **Coralina** |
| 1997 | 11,95 | 10,50 | N/A |
| 1999 | 12,47 | 10,81 | 7,04 |
| 2005 | 16,23 | 11,69 | N/A |
| 2010 | 19,03 | 12,53 | N/A |

Tabla 28. Proyección de demanda usuarios oficiales

| **Demanda Oficial (l/s)** | | | |
|---|---|---|---|
| **Año** | **Ingeominas** | **A & R** | **Coralina** |
| 1997 | 12,86 | 23,22 | N/A |
| 1999 | 12,32 | 23,54 | 15,42 |
| 2005 | 12,93 | 23,39 | N/A |
| 2010 | 13,22 | 23,05 | N/A |

Tabla 29. Proyección de demanda total

| **Demanda Total (l/s)** | | | |
|---|---|---|---|
| **Año** | **Ingeominas** | **A & R** | **Coralina** |
| 1997 | 215,69 | 216,54 | N/A |
| 1999 | 214,67 | 220,27 | 174,83 |
| 2005 | 249,58 | 224,13 | N/A |
| 2010 | 274,01 | 226,29 | N/A |

Como se observa en las tablas anteriores la proyección de CORALINA para el año 1999 es inferior a los valores de los demás estudios, lo cual se explica por que no se consideró un coeficiente de pérdidas. Con respecto al cálculo de la demanda de la población flotante, la diferencia radica en el tiempo de estadía supuesto en cada estudio; para Coralina este tiempo de estadía es en promedio de 4 días por turista, mientras que en A&R, 1997 se tomó el promedio mensual máximo, es decir un tiempo de estadía de 6 días y un crecimiento anual del 3%.

En el estudio de A & R se asume que el IANC decrece gradualmente con el tiempo para pasar del 35% en 1997 al 20% en el 2008, por lo que a pesar del crecimiento poblacional no hay un aumento apreciable de la demanda en el período 1997-2010. Está hipótesis no se ha cumplido, por lo que tales proyecciones pierden validez, dado que el volumen de agua efectivamente entregado a los usuarios ha sido subvalorado.

Se concluye que la mayor presión sobre el recurso hídrico lo ejerce el sector residencial, seguido por el de población flotante, el cual tiene mayor importancia para el estudio realizado por INGEOMINAS. Según el Decreto 1541 de 1974 (Artículos 41 y 43), el abastecimiento humano tiene prioridad sobre los otros usos del agua, por lo que el estudio se centró en la estrategia para abastecer inicialmente a la comunidad residente y posteriormente al resto de sectores.

## 7.4 Datos censales

Se recolectaron los resultados de los censos de población realizados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE desde el año de 1973 hasta el censo del 2005; para este último, dado el porcentaje de omisión censal, el DANE presenta valores de población neta encuestada y población conciliada. Según este censo el municipio tenía una población de 65.627 habitantes. En la Tabla 30, se presentan los resultados de los censos de 1964, 1973, 1985, 1993, 1999 y 2005 para el municipio de San Andrés.

Tabla 30. Datos censales

| Año censal | Población total | Cabecera | Resto |
|---|---|---|---|
| 1964 | 14 413 | 9 040 | 5 373 |
| 1973 | 20 359 | 14 359 | 6 000 |
| 1985 | 32 282 | 23 340 | 8 942 |
| 1993 | 46 254 | 33 937 | 12 317 |
| 1999 | 53 159 | 38 516 | 14 643 |
| 2005 | 65 627 | 48 421 | 17 206 |

En la Tabla 30 se observa el rápido crecimiento de la población de la isla, debido principalmente a la migración, según Roca M., 2003. Sin embargo la tasa de crecimiento se mantiene alrededor del 4% para el período comprendido entre 1964 y 1993, y presenta un fuerte decrecimiento durante el final de la década de los noventa, para luego repuntar nuevamente. Esta disminución en la tasa de

crecimiento se debió en gran medida a la apertura económica en Colombia que opacó el interés comercial que existía en la isla al ser puerto libre y por tanto disminuir la migración (Roca M., 2003). Es probable que hayan influido además los controles impuestos a la inmigración por parte del artículo 310 de la Constitución Política de Colombia de 1991, en los cuales se dan las herramientas necesarias para restringir el establecimiento de nuevos inmigrantes en la Isla de San Andrés.

## 7.5 Índice de agua no contabilizada

Para el análisis de la demanda de agua de una población, se deben involucrar las pérdidas generadas en los sistemas de conducción y distribución del agua tratada hasta los usuarios finales; esta pérdida de agua se refleja directamente en la oferta, dado que se requerirá un porcentaje mayor de agua para garantizar a cada usuario la cantidad de agua que requiere para el desarrollo de sus actividades (dotación).

Para el control de los volúmenes de agua no contabilizados (pérdidas del sistema de abastecimiento de agua) se ha diseñado un indicador de la eficiencia de las Empresas Prestadoras de éste Servicio (EPS), denominado índice de agua no contabilizada (IANC), el cual se define como el porcentaje del volumen de agua no facturada con relación al volumen entregado por las plantas de tratamiento al sistema de acueducto (producción neta).

El índice de agua no contabilizada se define como:

$$IANC = 1 - \frac{V_f}{V_p}$$

Donde:

Vf = Volumen de agua facturado en m3

Vp = Volumen de agua producido en m3

El IANC incluye la pérdida técnica, la pérdida no-técnica y el consumo legal no-facturado. La suma de estos dos últimos componentes constituye la llamada pérdida comercial. Para determinar el nivel

de eficiencia de los prestadores con relación a las pérdidas de agua es necesario clasificarlas adecuadamente, para definir exactamente que pérdidas están fuera del control del prestador y cuáles son resultado de la gestión de la empresa (CRA, 2007).

El IANC usado para el análisis se obtuvo de los reportes de PROACTIVA en el 2008 en su Plan de ahorro y Uso eficiente del agua, el cual se reporta en un 78%, básicamente por las fugas en el sistema y además por las conexiones clandestinas. Como meta de reducción PROACTIVA se propone una reducción entre el 2 y el 10% anual.

## 7.6 Proyecciones de población a partir de los datos censales

### 7.6.1 Métodos Tradicionales de Proyección de Población residencial

Las proyecciones de la población del municipio, que se muestran en la Tabla 31 se realizaron a partir de los datos de censos históricos desde 1964 hasta el 2005, mediante los métodos Aritmético, Geométrico, Método de la Universidad Nacional, de variación logarítmica y de tasa decreciente.

Analizando la Tabla 31 se encuentran dos tendencias importantes, la primera involucra las proyecciones más bajas correspondientes a los métodos de la Universidad Nacional y el método Aritmético, con una estimación promedio de la población al año 2030 de 107.000; este valor será empleado en la estimación de la demanda de agua en los escenarios más optimistas.

Tabla 31. Proyecciones de población por métodos tradicionales

| **Año** | **Método** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Aritmético** | **Geométrico** | **M. UNAL** | **Var. Log.** | **Tasa Decreciente** |
| 2005 | 65627 | 65627 | 65627 | 65627 | 65627 |
| 2010 | 73963 | 78363 | 75187 | 83030 | 77673 |
| 2015 | 82300 | 93572 | 84050 | 105048 | 91456 |
| 2020 | 90636 | 111731 | 92268 | 132905 | 107227 |
| 2025 | 98972 | 133415 | 99887 | 168150 | 125273 |
| 2030 | 107308 | 159307 | 106952 | 212740 | 145921 |

La segunda tendencia, más alta, correspondiente a los métodos Geométrico y Tasa Decreciente con una población promedio para el mismo año de 152.614 habitantes; dicha estimación servirá como base para el cálculo de la demanda en los escenarios considerados pesimistas. El método de la Variación Logarítmica presenta proyecciones muy altas respecto a los métodos anteriores por lo cual no se consideró en el estudio.

### 7.6.2 Proyección de población flotante

Las estadísticas reportadas por la Secretaría de Turismo (PMAS, 1999), muestran que los niveles de la llegada de visitantes a la isla presentan a 2008 los mismos niveles del año 1997. Para reforzar esta conclusión, se observa que las tasas de crecimiento de turistas decayeron fuertemente a partir del año 1992, probablemente debido a la apertura económica, por lo que la mercancía que se conseguía a precios significativamente menores en el archipiélago ahora se conseguía también de manera legal en el continente a precios equivalentes, disminuyendo así el turismo nacional. A partir de 1997 los turistas estuvieron alrededor de 350.000, con un ligero repunte en los últimos 3 años hasta llegar alrededor de los 390.000.

La población flotante máxima se estimó tomando el mes con más turistas promedio (es decir diciembre con 42.418 ± 1600 turistas) y asumiendo que, según datos del Plan de Manejo de Aguas Subterráneas (1999), en promedio permanecen 4 días en la isla. Con base en esto la población flotante máxima diaria es de 5.655 turistas. El crecimiento esperado de dicha población flotante es de 2.6% anual según los cálculos de Proactiva (2008) y la dotación es de 289 l/hab-día según los estudios de INGEOMINAS (1997), A & R (1997) y el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas (1999).

## 7.7 Escenarios de proyección de demanda

Para los escenarios de proyección de demanda se tomaron las siguientes consideraciones y suposiciones. En primer lugar, dado que el acuífero de San Andrés tiene unas reservas limitadas para la explotación sostenible de agua dulce, se propone para el sector turístico, la utilización de plantas desalinizadoras. Estas plantas han producido agua potable desde hace muchos años, pero el proceso era muy costoso y hasta hace relativamente poco sólo se utilizaba en condiciones extremas. El proceso actualmente más utilizado es el de ósmosis inversa, en que una solución altamente

concentrada en sales es obligada mediante presión, a pasar a través de una membrana muy fina, produciéndose de esta manera agua dulce a partir de agua salada. Existen plantas con eficiencia de hasta el 75%. Las plantas de desalinización generalmente son más compactas y pequeñas que otros sistemas convencionales de tratamiento de aguas. Están compuestas de un sistema de filtros y bombas, que permite un crecimiento programado según las necesidades futuras.

En segundo lugar considerando la estructura de la oferta de agua en la isla, planteada por el PMAS (1999) (Tabla 32), se observa que en el caso del agua proveniente del Cove se está extrayendo el 72% del agua concesionada y el 50% para el caso del agua desalinizada. Como se ha podido corroborar a partir de la modelación numérica, no es seguro explotar del acuífero del Cove a una tasa de más de 40 l/s hasta que no se tenga mayor información del mismo, por lo que la recomendación es extraer máximo un 80% de este valor, es decir 30 l/s (85% del caudal concesionado), ya que los costos ambientales por sobreexplotación, asociados al impacto sobre el ecosistema para conservar la biodiversidad de la isla, pueden ser invaluables. Igualmente, respecto a los caudales para la desalinización lo más conveniente para garantizar el abastecimiento de la población residente es explotar al máximo este recurso, es decir utilizar toda la capacidad instalada de la planta (140 l/s). De otro lado el caudal de agua captada de aljibes y barrenos, que es tomada principalmente por la población residente, tiene como fuente las estadísticas del DANE (PMAS, 1999), por lo que su valor actual se calculará como la proyección a 2008, con la tasa de crecimiento de la población residente durante este período.

Tabla 32. Composición de las fuentes de abastecimiento de agua en la isla

| **Fuente** | **Caudal otorgado (l/s)** | **Caudal promedio explotado (l/s)** | **Tomado de** |
|---|---|---|---|
| Pozos Cove | 35 | 25 | Piñeros A., 2008 |
| Desalinización | 140 | 70 | Piñeros A., 2008 |
| Aljibes y barrenos | - | 99.8 | PMAS, 1999 |

En tercer lugar respecto a la dotación mínima vital se espera que para el 2030 sea de 100 l/hab-día según la Resolución 2320 del 27 de noviembre de 2009. El índice INAC debe llegar al 30% para el año 2020, y las expectativas de Proactiva es reducirlo a una tasa entre 2% y 10% anual.

Teniendo en cuenta los tres aspectos mencionados, se plantearon algunos escenarios de demanda básicos, que involucran el crecimiento de las poblaciones residente y flotante, la reducción del

Índice de Agua No Contabilizada (INAC), la reducción de la dotación mínima vital, así como las condiciones actuales y futuras de explotación. Las características y el análisis de cada uno de estos escenarios se presentan en el Anexo 1. De dicho análisis se concluye finalmente que el elemento más sensible dentro del sistema de abastecimiento de agua potable en la isla de San Andrés es el Índice de Agua No Contabilizada, por lo que una fuerte inversión en el mejoramiento de la red de acueducto y control del fraude puede garantizar en gran parte el abastecimiento de agua potable de la isla, sin necesidad de nuevas plantas de tratamiento ni aumento de las concesiones otorgadas.

# 8. Lineamientos técnicos para el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas

## 8.1 Introducción

Un Plan de Manejo de Aguas Subterráneas (PMAS) tiene como objetivo fundamental integrar estrategias metodológicas para la planificación y el manejo de los recursos de aguas subterráneas. En general se deben tener en cuenta tres aspectos para la planificación: la equidad social, la eficiencia económica y la sostenibilidad ambiental. La equidad social se refiere al abastecimiento adecuado en cantidad y calidad para todos los usuarios, teniendo en cuenta la capacidad de pago y uso dado por cada uno de ellos; la eficiencia económica hace referencia a la minimización del costo de abastecimiento y la reducción de pérdidas; la sostenibilidad ambiental se relaciona con la prevención de la degradación del recurso en forma de agotamiento, contaminación o salinización (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

El modelo desarrollado para la planificación se basa en tres elementos: demanda, distribución y abastecimiento de agua; Este modelo se basa en la satisfacción de las necesidades de los usuarios pero tiene sólidos fundamentos técnicos que exigen desarrollar un conocimiento del balance hidrológico y los factores que intervienen en él. En general se han identificado varios problemas inmediatos o potenciales en el proceso de abastecimiento y distribución de agua:

- Insuficiencias o irregularidades en el abastecimiento: se relaciona con los problemas inherentes a la red de almacenamiento y distribución de agua, como fugas no controladas.

- Agua de baja calidad: la contaminación del agua subterránea puede ser originada por dos fuentes: la percolación de efluentes y fluidos o por salinización de suelos y avance de cuña marina en zonas costeras.

- Falta de sostenibilidad: la degradación o daño del recurso como consecuencia de la actividad humana indiscriminada. Puede estar relacionada con la sobre-explotación de acuíferos y percolación de contaminantes químicos y/o biológicos.

Una información técnica confiable es fundamental para que los responsables del manejo y administración de los recursos hídricos tomen las decisiones adecuadas con el fin de hacer un uso eficiente y sostenible del recurso subterráneo. En los Planes de Manejo de Aguas Subterráneas la información sobre el potencial de los acuíferos, su vulnerabilidad a la contaminación y la evaluación del riesgo de contaminación se constituye en la base técnica del proceso. En este capítulo se presentan algunos conceptos técnicos para el manejo y explotación del acuífero derivados del análisis de los modelos conceptual y numérico, del mapa de vulnerabilidad y de la evaluación de cambio climático.

En particular para la isla de San Andrés en 1998 se inició la formulación del Plan de Manejo de Aguas Subterráneas, el cual además de tener los componentes técnico y legal, contó con los aspectos socioeconómicos que caracterizan el aprovechamiento de este recurso. El proyecto buscó fortalecer institucionalmente a Coralina (autoridad ambiental del Departamento de San Andrés Isla), en su capacidad técnica para adelantar estudios hidrogeológicos que incrementen el conocimiento del recurso, permitiendo al mismo tiempo mejorar la eficiencia de los procedimientos internos que sobre aguas subterráneas maneja la entidad.

## 8.2 Plan de Manejo de Aguas Subterráneas de la isla de San Andrés

Doce instrumentos de planificación conforman el PMAS de la isla de San Andrés, cada uno de ellos acompañado de una estrategia de educación ambiental, una de participación ciudadana, una de investigación y una de seguimiento y evaluación. Entre los instrumentos sobresalen las concesiones para los pozos que son explotados de manera comercial, el fortalecimiento de organizaciones comunitarias para diseñar, buscar financiación e implementar pequeños proyectos orientados a soluciones al manejo de residuos líquidos, la captación de agua lluvia, manantiales o pozos comunitarios y la ordenación de la cuenca del Cove, la cual incluye incentivos económicos y transferencia de conocimientos a los agricultores.

Dado que más del 95% del agua utilizada en la isla es para consumo humano, el énfasis en el PMAS se dirigió hacia el mejoramiento de la calidad del agua que está en uso y la preservación de las fuentes hídricas que presentan un estado aceptable. El PMAS fue diseñado para un horizonte de 10 años, con evaluaciones periódicas cada 3 años y con el desarrollo del modelo numérico es posible definir nuevas estrategias para preservar la sostenibilidad del acuífero.

En el PMAS vigente se tomaron cuatro componentes básicos:

- La normatividad: en ella están todas las herramientas legales que permiten regular la explotación del recurso. Todas las opciones técnicas, económicas y sociales (incluyendo la participación comunitaria), identificadas para combatir las amenazas de contaminación a los acuíferos, son traducidas al idioma del derecho con el fin de darle vida jurídica al Plan de Manejo.

- Programa de Seguimiento y Control: Son las acciones técnicas identificadas para asegurar una correcta explotación de las aguas subterráneas y así evitar su agotamiento.

- Programa de Educación y Divulgación: Es la estrategia que utiliza el PMAS para estimular un cambio de actitudes en la población hacia hábitos acordes con la preservación del recurso hídrico subterráneo.

- Programa de Investigación: Es el plan de trabajo a seguir, en un periodo igual a la duración del PMAS en ejecución, con el objeto de reducir los vacíos de información existentes. La información que se desea adquirir puede ser de tipo técnico, social, económico o legal.

Sin embargo a pesar de los programas de monitoreo e investigación es importante destacar que durante el desarrollo del estudio se tuvieron grandes inconvenientes con la calidad y la cantidad de información disponible. Existen vacíos de información muy importantes para la determinación de un balance hidrológico consecuente y se encontraron deficiencias en el manejo y explotación del acuífero. Aún así gracias a la implementación del modelo numérico, el análisis de niveles piezométricos en los pozos y el análisis de vulnerabilidad ha sido posible determinar límites de explotación y zonas de protección que permiten la definir nuevas estrategias para la conservación del recurso.

## 8.3 Lineamientos técnicos y operativos

### 8.3.1 Seguimiento y control

Para la preservación del recurso hídrico se deben establecer estrategias que permitan explotar de manera eficiente el acuífero; el modelo numérico ha demostrado que una extracción superior a 30 l/s tiene como consecuencia la intrusión salina en todos los pozos; el aumento de la cantidad de agua concesionada deberá estar sustentada con estudios que tengan en cuenta las estructuras kársticas del acuífero de tal forma que no se arriesgue la sostenibilidad del mismo.

El modelo numérico demostró también que bajo condiciones de cambio climático, especialmente cambios en la cantidad y distribución temporal de la precipitación, la calidad y cantidad de agua dulce disponible para abastecer la demanda se puede afectar seriamente. El modelo conceptual de tanques ratificó que sistema acuífero de la isla es altamente sensible a la recarga, con cambios rápidos en los niveles piezométricos. Es necesario entonces explorar metodologías que permitan garantizar la recarga del acuífero, evitando que toda el agua lluvia que se convierte en escorrentía superficial directa se pierda.

Del análisis de oferta y demanda se concluye que la proyección de demanda de la isla puede ser abastecida completamente si la dotación se reduce hasta 100 l/hab/día como lo estipula la Resolución 2320 del 27 de noviembre de 2009 y el Índice de Agua No Contabilizada (IANC) se reduce del 70% actual al 30% para el año 2020 (escenario optimista), como lo muestra la Figura 63. Actualmente, según datos oficiales de Proactiva y Coralina, la demanda no abastecida supera los 150 l/s, teniendo en cuenta la explotación de aljibes y barrenos domésticos que según el DANE supera los 100 l/s.

Para satisfacer la demanda de la población residente se deben explorar opciones

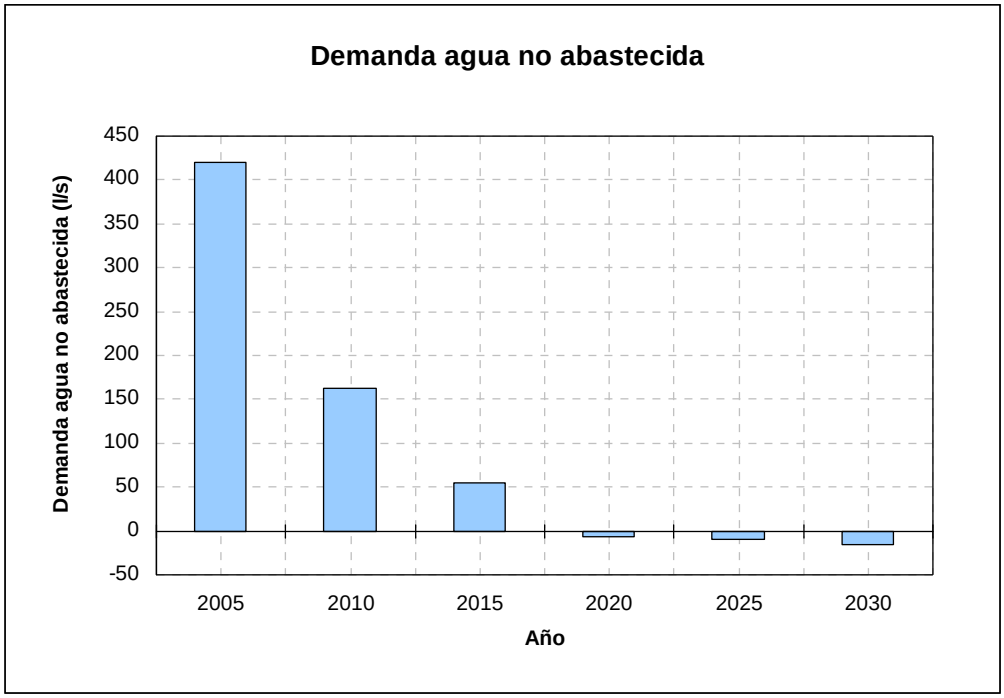


Figura 63. Demanda de agua no abastecida para un escenario optimista

Respecto a las tarifas, es importante en primer lugar abastecer con agua potable la población residente de la isla, de tal forma que sean los más beneficiados con los recursos del agua de la zona del Cove. Para la población flotante se puede establecer una tarifa que cubra los costos derivados de la desalinización del agua, y que sea incluida en los costos de alojamiento. De igual manera, se deben establecer tarifas variables con el consumo de agua de cada vivienda, de tal forma que se estimule el ahorro y el uso eficiente del agua.

Del análisis de vulnerabilidad se derivan algunas conclusiones importantes. La zona de más baja vulnerabilidad según los dos métodos empleados (EPIK y COP), constituye la zona de mayor amenaza en la parte urbana de la isla debido a las descargas no controladas de aguas servidas; a pesar de las bajas conductividades de esta parte de la isla y el espesor de las capas protectoras, se deben encaminar acciones para reducir la carga contaminante en la parte urbana. Respecto a la zona del Cove, donde la vulnerabilidad a la contaminación es alta, se debe seguir con los procesos de protección y microzonificación de la cuenca, así como con las campañas educativas para los agricultores de la zona. Se debe tener especial atención con las zonas de cultivos ya que son zonas preferenciales de infiltración de nitratos.

El monitoreo de los pozos de explotación debe continuar siendo un prioridad para la autoridad regional. Sin embargo es necesario tener información más consolidada de los niveles dinámicos en los pozos así como una red de piezómetros de monitoreo que permita conocer de manera más precisa el comportamiento del flujo en el acuífero. Dadas las características kársticas del medio, se hace necesario una estricto seguimiento de la química del agua subterránea, así como el monitoreo horario de tormentas y caudales de los ríos intermitentes de la isla. De igual forma la identificación de zonas preferenciales de flujo mediante trazadores o metodologías isotópicas es una herramientas muy potente para determinar el comportamiento regional del acuífero y las zonas preferenciales de recarga.

Se recomienda adicionalmente la realización de pruebas de bombeo de larga duración, ya que éstas dan cuenta del comportamiento a nivel local de sistemas interconectados de conductos o zonas fracturadas. Pueden ser un insumo importante en la determinación de zonas adicionales de bombeo seguro, así como la identificación de los diferentes tipos de flujo que intervienen en cada zona.

## 8.3.2 Programa de Investigación

### 8.3.2.1 Hidrología

La investigación en la parte hidrológica debe ser encaminada al fortalecimiento del registro de datos de variables como lluvia, temperatura, velocidad de viento, radiación, temperatura superficial del mar, caudales de corrientes intermitentes, entre otras. Es importante establecer una red de monitoreo de caudales de los gullies para complementar el balance hidrológico de la isla. Igualmente respecto a la información de lluvia, se debe realizar un esfuerzo en la elaboración de una curva IDF (Intensidad, Frecuencia, Duración) a partir de registros de menor resolución temporal (actualmente sólo se dispone de registros diarios).

A partir de nueva información recopilada se deben continuar los estudios de cambio climático, con el fin de cuantificar posibles cambios en el balance hídrico de la isla y tomar medidas preventivas o correctivas para la protección del acuífero y los ecosistemas de la isla.

### 8.3.2.2 Hidrogeología

A partir de los datos de hidrógrafas de manantiales, de análisis de trazadores e isotopía, del monitoreo de pozos, se pueden realizar estudios destinados a comprender el comportamiento del acuífero ante eventos de lluvia, el tiempo de respuesta del mismo, la evaluación de diferentes zonas

de recarga, como insumos importantes para el modelo numérico desarrollado. Se pueden desarrollar ejercicios interesantes analizando eventos de tormentas y las respuestas hidrológicas y químicas del acuífero a nivel horario.

De igual forma la hidrogeoquímica y trazadores ambientales y artificiales constituyen herramientas de exploración e investigación de gran potencialidad, con mucho campo aún por descubrir. Las sales disueltas en las aguas kársticas y sus contenidos isotópicos dan cuenta de la historia, sistemas de flujo preferencial y toda una serie de procesos relacionados con la hidrodinámica y la naturaleza litológica de los límites (Custodio, 1986). Es por ello que se tiene tendencia en la actualidad a considerarlos como trazadores ambientales o naturales, que aportan información global a medio y largo plazo (Fidelibus y Tulipano, 1990). Los isótopos se utilizan para determinar la edad de las aguas o los tiempos medios de residencia (radiactivos), o las áreas de recarga preferente; a escala más local, se pueden utilizar en la delimitación de perímetros de protección. Las técnicas isotópicas pueden tener especial interés en la determinación de la descarga al mar de los acuíferos costeros kársticos, especialmente los isótopos del radón (Cable et al., 1996 a y b; Moore, 1996).

Respecto a las pruebas de bombeo, se propone realizar pruebas de larga duración (mayores a un día) para evaluar la respuesta de las diversas estructuras kársticas involucradas en el flujo local.

#### 8.3.2.3 Geología

Respecto a la geología en importante reconocer las estructuras kársticas más importantes, a partir de técnicas geofísicas. Actualmente para la isla se han aplicado técnicas geoeléctricas en la modalidad de SEV (Sondeo Eléctrico Vertical). Según Arandjelovic (1984) este tipo de arreglos son útiles al momento de definir la franja karstificada sobre la franja de roca calcárea poco o no karstificada, ya que presentan contrastes notorios de conductividad. Sin embargo la interpretación inadecuada de los SEV puede tener graves consecuencias, al considerar prácticamente impermeables calizas desde una profundidad dada (Pulido, 2001). Tal vez las aplicaciones más importantes de los SEV son la detección de material carbonatado bajo un recubrimiento de otra naturaleza hidrogeológica (arcillas o margas) y la identificación del contacto agua dulce – agua salada. A continuación se presentan otros métodos que han sido aplicados en la exploración geológica de karst.

Los métodos electromagnéticos, aunque de aplicación más costosa en general, pueden llegar a ser mucho más resolutivos que los eléctricos convencionales (Granda et al., 1987), permitiendo la localización de discontinuidades. Las diferentes modalidades de Sondeos Electromagnéticos, VLF,

Slingram, Polarización Inducida en los dominios de tiempo y frecuencia, identifican bien los contactos litológicos y las grandes fracturas. Igualmente las tomografías de resistividad en 2D y 3D pueden ser muy resolutivas en medios anisótropicos como las calizas karstificadas (Ogilby et al., 1999), especialmente cuando se complementan con datos suministrados por sondeos mecánicos.

Entre otros métodos que han sido aplicados en la identificación de estructuras kársticas se encuentran los métodos sísmicos, especialmente de reflexión, son muy resolutivos, aunque de muy alto costo; los avances tecnológicos en la sísmica aplicada a la investigación petrolífera son muy grandes, pudiendo trabajar en 2-D y 3-D, con resoluciones muy grandes. La sísmica de refracción, mucho menos costosa, arroja anomalías muy llamativas (Müller, 1979) cuando existen grandes discontinuidades en el subsuelo (cavernas) aunque no es muy resolutiva en la mayoría de los casos restantes, especialmente si la geometría de los contactos litológicos es muy irregular. De otro lado el radar (con principios de aplicación muy parecidos a los de los métodos sísmicos) constituye también una técnica de gran potencialidad en la detección de fracturas, discontinuidades e incluso cavidades situadas a escasa profundidad (menos de 50 m); tanto en la modalidad de calicatas como en la de sondeos de velocidad, los resultados que se pueden obtener son bastante satisfactorios. La gravimetría y microgravimetría ha sido aplicada con éxito en la localización de zonas de fractura (Granda, 1986) y cavidades no muy profundas, aunque su aplicación, además de costosa, tiene numerosas incertidumbres que hacen que sea poco utilizada en la vida real. Ello se debe, entre otros motivos, a que las áreas kársticas, especialmente el “karst de montaña”, presentan una topografía muy abrupta, por lo que las correcciones a realizar pueden introducir errores superiores a la anomalía generada por el rasgo kárstico buscado.

Los registros en sondeos constituyen una herramienta de exploración en el karst con grandes perspectivas, no sólo por la información que aportan sobre la obra en sí, sino por que permiten identificar flujos preferenciales, existencia de alimentación vertical, discontinuidades; posiblemente los registros termométricos (además de ser muy poco costosos y sencillos) sean los de mayor resolución, aplicados con mucho éxito en Italia (Tulipano, 1988; Tulipano y Fidelibus, 1995) y, más recientemente, en España (Molina, 1998; Sánchez Martos, 1997). En esencia, el método consiste en hacer registros de temperatura del agua en una serie de sondeos con una sonda de adecuada precisión (0.05 ºC); las áreas de flujo preferencial presentarán una anomalía negativa en período de alimentación, cuando la temperatura ambiental es inferior a la media anual; los sectores con alimentación vertical ascendente presentarán anomalía térmica positiva. Aunque de muy fácil

aplicación, es preciso contar con suficientes sondeos igualmente penetrantes y de características constructivas bien conocidas para poder llegar a establecer la distribución tridimensional del campo de las temperaturas; es por ello que la aplicabilidad real es muy restringida. De otro lado posiblemente la herramienta más resolutiva en sondeos sea la cámara de video sumergible; los nuevos equipos en color, con cobertura en todas las direcciones, zoom, y capaces de resistir altas presiones, constituyen la mejor posibilidad de reconocimiento del karst en profundidad, con resolución solamente superable por la observación directa en afloramiento (Pulido Bosch et al., 1999).

# Bibliografía

ADAMS, B., FOSTER S., Land-surface zoning for groundwater protection, J. Institute Water Environmental Manage 6, pp. 312–320, 1992.

ALBINET, M., MARGAT, J., Cartographie de la vulnerabilit´e a la pollution des nappes d'eau souterraine, Bulletin de la Bureau de Recherches G´eologiques et Mini`eres 2nd serves 3(4), pp.13–22, 1970. *En Vías et al., 2006.*

ALLEN, M., INGRAM, W., Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle, Nature 419, pp.224–232, 2002

AMADOR, J., MAGAÑA, J., & PÉREZ, J., The low level jet and convective activity in the Caribbean, Preprints of 24th Conference on Tropical Meteorology, American Meteorological Society 114-115pp, 2000

ANDERSON, M.P., WOESSNER, W.W., Applied Ground Water Modeling, Academic Press, San Diego, 1992. *En Worthington, 2009.*

ANGEL y RODRÍGUEZ,. Plan director de acueducto y alcantarillado para San Andrés, Providencia y Santa Catalina al año 2027, 1996

ATKINSON, T.C., Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain), Journal of Hydrology 35, pp. 93–110, 1977

BAKALOWICZ, M., Karst groundwater: a challenge for new resources, Hydrogeology J., 13, pp. 148-160, 2005

BOER, G., Climate change and the regulation of the surface moisture and energy budgets, Climate Dynamics 8, pp.225–239, 1993

BRADBURY, K.R., DRIPPS W., HANKLEY C., ANDERSON M.P., & POTTER K.W., Refinement of Two Methods for Estimation of Groundwater Recharge Rates, Final project report to the Wisconsin Department of Natural Resources, 84 pp, 2000.

BUDYKO, M.I., Climate and Life, Hydrometeoizdat, Leningrado, 472 pp., 1971

BURDON, D.J., PAPAKIS, N., Handbook of Karst Hydrogeology, United Nations Special Fund, Athens, 276 pp., 1976. *En White, 2003*.

CABRALES, Tomado del documento Plan Maestro del Acueducto (Gobernación),1992

CHENG, A., OUAZAR, D., Coastal aquifer management: monitoring, modeling, and case studies, Volume 107, Lewis, 2004.

CHOUDHURY, B., Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model, Journal of Hydrology, pp. 99-110, 1999.

CORNATON, F., PERROCHET, P., Analytical 1D dual porosity equivalent solutions to 3D discrete continuum models. Application to kárstic spring hydrograph modeling, Journal of Hydrology, p. 165-176, 2002

CORALINA, Plan de Manejo de las aguas subterráneas, 1999

COUTAGNE, A., Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le déficit d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum, La Houille Blanche 6, pp. 360-369, 1954.

DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Censo General 2005 - Nivel Nacional, 2005. *Sitio Web: www.dane.gov.co, Fecha de visita: junio de 2009.*

DAUSMAN, A., LANGEVIN C., Movement of the saltwater interface in the surficial aquifer system in response to hydrologic stresses and water-management practices, Broward County, Florida, Scientific Investigations Report 2004-5256, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2005

DIEZZMANN, W., DELGADO, C., Aprovechamiento del depósito de agua subterránea dulce en la isla de San Andrés, Boletín Geológico Vol. 5, pp. 187-109, 1957.

DOERFLIGER, N., ZWAHLEN, F., Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK) – Application to Groundwater Protection Zones, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern, 1998.

DOERFLIGER, N., JEANNIN P.-Y., ZWAHLEN, F., Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method), 1999

FIORILLO, F., Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment, Journal of Hydrology, 373, pp. 290-301, 2009

FLEURY, P., PLANGNES, V., BAKALOWICZ, M., Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model, Journal of Hydrology, p 38-49, 2007

FORD, D.C., WILLIAMS, P.W., Karst Geomorphology and Hydrology, Unwin Hyman, London, 601 pp., 1989.

FOSTER, S., HIRATA, R., Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data, WHO-PAHO-CEPIS, Lima, 1988. *En Vías et al., 2006.*

GROISMAN, P., LEGATES, D., The accuracy of United States precipitation data, Bull Am Meteor Soc 75, pp.215–228, 1994

GENTHON, P., BATAILLE, A., FROMANT, A., D'HULST, D., BOURGES, F., Temperature as a marker for karstic waters hydrodynamics. Inferences from 1 year recording at La Peyre´re cave (Ariege, France), Journal of Hydrology, 311, pp. 157–171, 2005

GUZMÄN, G., HERNÁNDEZ, O., Cartografía Geológica de la isla de San Andrés. Proyecto: Estudio del Acuífero de San Andrés y recuperación del campo de Pozos. INGEOMINAS, 1992.

HARBAUGH, A.W., BANTA, E.R., HILL, M.C., MCDONALD, M.G., MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User Guide to Modularization Concepts

and theGround-Water Flow Process, Open-File Report 00-92 U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2000. *En Quinn et al., 2006*

HUGUETT, A., Compilación Hidrogeológica de Las Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia, Anexo1, Mapa hidrogeológico de las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, INGEOMINAS, 1989.

INGEOMINAS, Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química, Caracterización y modelación del régimen de las aguas subterráneas, Colombia, 1997.

INGEOMINAS, Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química, Programa de exploración de aguas subterráneas, Colombia, 2004.

INGESTUDIOS, Proyecto de desarrollo institucional, en el estudio de demanda de agua, 1996

KIRALY L., Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaines des caractères physiques des roches karstiques, En : Burger A. and Dubertret L. (Eds), Hydrogeology of karstic terrains, Int. Union of Geol. Sciences, B, 3, pp. 53-67, 1975. *En Kiraly, 2003.*

KIRALY, L., PERROCHET, P., and ROSSIER, Y., Effect of the epikarst on the hydrograph of karst springs: a numerical approach, Bulletin du Centre d'Hydrogéologie 14, pp.199-220, 1995. *En Kiraly 2003*

KIRALY, L., Karstification and Groundwater Flow, Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, pp. 2-26, 2003.

KARIMI, H., RAEISI E., BAKALOWICZ, M., Characterising the main karst aquifers of the Alvand basin,northwest of Zagros, Iran, by a hydrogeochemical approach, Hydrogeology Journal, 13, pp. 787-799, 2005

LANGEVIN, C. D., Simulation of ground-water discharge to Biscayne Bay, southeastern Florida, Technical Report Water-Resources Investigations Report 00-4251, U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Tallahassee, Florida, 2001

LANGEVIN, C.D., SHOEMAKER, W.B, GUO, W., MODFLOW-2000, the U.S.Geological Survey Modular Ground-Water Model—Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the

Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT), U.S. Geological Survey Open-File Report 03-426, 2003.

LÓPEZ CAMACHO, B., Método simplificado de gestión de acuíferos para su integración en sistemas de explotación conjunta, IV Asamblea General de Geodesia y Geofísica Zaragoza, 1981.

MAHLER, B. J., GERNER, B. D., Using Nitrate to Quantify Quick Flow in a Karst Aquifer, Groundwater, Vol 47, pp. 350-360, 2009

MALOSZEWSKI, P., STICHLER, W., ZUBER, A., RANK, D., Identifying the flow systems in a karstic-fissured-porous aquifer, Scheealpe, Austria, by modelling of environmental 18O and 3H isotopes. Journal of Hydrology 256, 48–59. 2002

MARECHAL J. C. et al., Interpretation of pumping tests in a mixed flow karst system, Water Resources Research, 2008.

MARECHAL J. C. et al., Karst flash flooding in a Mediterranean karst, the example of Fontaine de Nîmes, Engineering Geology, pp. 138-146, 2008.

MASTERSON, J. P., GARABEDIAN, S. P., Effects of sea-level rise on ground water flow in a coastal aquifer system, Ground Water 2, pp. 209–217, 2007

McDONALD, M.G., HARBAUGH, A.W., A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 83-875, 528 p., 1984.

MEEHL, G., ZWIERS, F., EVANS, J., KNUTSON, T., MEARNS, L., WHETTON, P., Trends in extreme weather and climate events: issues related to modelling extremes in projections of future climate change. Bull Am. Meteor Soc. 81, pp. 427–436, 2000b. *En Pall et al., 2006*

MILANOVIC, P. T., Karst Hydrogeology, Water Resources Publications, 1979

MOENCH, A.F., Double-Porosity Models for a Fissured Groundwater Reservoir With Fracture Skin. Water Resources Research, vol. 20, No. 7, pp.831-845, 1984

MOENCH, A.F., Specific Yield as Determined by Type-Curve analysis of Aquifer_Test Data, Ground Water, vol. 32, No.6, pp. 949-957, 1994

MOORE, P. J., MARTIN, J. B., SCREATON, E., J., Geochemical and statistical evidence of recharge, mixing, and controls on spring discharge in an eogenetic karst aquifer, Journal of Hydrology, 376, pp. 443–455, 2009

MULLIGAN, A., EVANS R., LIZARRALDE D., The role of palochannels in groundwater/seawater exchange, Journal of Hydrology 3-4, pp. 313-329, 2007

PALL, P., ALLEN, M.R., STONE, D.A., Testing the Clausius–Clapeyron constraint on changes in extreme precipitation under CO2 warming, Climate Dynamics 28, pp. 351-363, 2006

PERRIN, J., JEANNIN, P. Y., ZWAHLEN, F., Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland, Journal of Hydrology, 279, pp. 106-124, 2003

PERRIN, J., JEANNIN, P. Y., ZWAHLEN, F., Implications of the spatial variability of infiltration-water chemistry for the investigation of a karst aquifer: a field study at Milandre test site, Swiss Jura, Hydrogeology Journal, 11, 673-686, 2003

PIÑEROS, M., LEMOINE, C., Aplicación del modelo de simulación GRWF-SALT al acuífero de San Andrés Islas, Universidad Pontificia Javeriana, Facultad de Ingeniería, 1987

PMAS, Plan de Manejo de Aguas Subterráneas, CORALINA, 1999

POVEDA, G., MESA, O., La corriente del Chorro superficial del oeste (“del CHOCO”) y otras dos corrientes de chorro en Colombia: Climatología y variablidad durante las fases ENSO, Revista Acad. Col. Ciencias, pag 517-528, 1999

POVEDA, G., ENSO-related variability of river discharges and soil moisture in Colombia, Biospheric Aspects of the Hydrologic Cycle, vol. 8, pp. 3– 6, 2000

POVEDA et al., Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 234, p 3 – 27, 2006

QUINN, J.J., TOMASKO, D., KUIPER, J.A., Modeling complex flow in a karst aquifer, Sedimentary Geology 184, pp. 343–351, 2006.

ROBINS, N., ADAMS, B., FOSTER, S., PALMER, R., Groundwater vulnerability mapping: the British perspective, Hydrogéologie 3, pp.35–42, 1994. *En Doerfliger et al., 1999*

ROCA, M., La continentalización de la isla de San Andrés, Colombia: Panyas, raizales y turismo, 1953-2003, Centro de estudios económicos de regionales, Banco de la República, Cartagena de Indias N°37, 2003.

RYAN, M., MEIMAN, J., An examination of short-term variations in water quality at a karst spring in Kentucky. GroundWater 34, pp. 23–30, 1996.

SAHUQUILLO A., Modelos Pluricelulares Englobados, Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas, B-4, Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia, España, 1–7, 1983.

SHUSTER, E. T, and WHITE, W. B., Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers, J. Hydrology 14, pp. 93-128, 1971. *En White, 2003.*

SMART, P. L., and HOBBS, S. L., Characterization of carbonate aquifers: A conceptual base, Proceedings of the Environmental Problems in Karst Terranes and Their Solutions Conference, Bowling Green, 1986. *En White, 2003*

TÉMEZ, J.R., Modelo matemático de transformación “Precipitación- Aportación”, Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL), 1977.

TEUTSCH, G., SAUTER, M., Groundwater modeling in karst terranes: scale effects, data acquisition and field validation, Proceedings of the Third Conference on Hydrogeology, Ecology, Monitoring, and Management of Ground Water in Karst Terranes Nashville, TN, pp. 17– 35, 1991. *En White, 2003*.

THOMA, M., NELSON G., Manual for development of a transient modow/mt3dms/seawat simulation for the 2001 tracer test at the boise hydrogeophysical research site, Technical Report BSU CGISS 08-02, Center for Geophysical Investigation of the Shallow Subsurface and Department of Geosciences, Boise State University, 2008

TORAN, L., WHITE, W. B., Variation in nitrate and calcium as indicatorsof recharge pathways in Nolte Spring, PA, Environ. Geol., 48, pp 854-860, 2005

THORNWAITE, C.W., MATHER, J.R, Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance, Climatology. Lab. Climatol. Dresel Institute Technol., 10(3), 185-311, 1957

TRENBERTH, K., Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change, Climate Change 42, pp.327–339, 1999b. *En Pall et al., 2006*

TRENBERTH, K., DAI, A., The changing character of precipitation. Bull Am Meteor Soc 84, pp.1205–1217, 2003. *En Pall et al., 2006*

TURC, L., Evaluation des besoins en eau d'irrigation: evapotranspiration potentielle. Ann. Agron., 12, pp. 13-46., 1961.

UNAL, Modelación del acuífero de San Andrés bajo escenarios de cambio climático, Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, 2010.

VARGAS, G., Geología y aspectos geográficos de la Isla de San Andrés, Geología Colombiana N°29, 2004.

VARGAS, M., Caracterización y modelación del régimen de las aguas subterráneas. Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés, INGEOMINAS, 1997.

VÉLEZ, J.I., SAHUQUILLO, A., FRANCÉS, F., GARCÍA R., Evaluación de la recarga del acuífero que alimenta al manantial de los Santos, Alcudia de Crespins (Valencia), Evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica., Instituto Tecnológico Geominero de España, 1997.

VÉLEZ, M.V., Hidráulica de las Aguas Subterráneas, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 2004.

VÉLEZ, M.V., SALAZAR, J.F., BOTERO, V., Estimación de la recarga en una región colombiana mediante un modelo iterativo, Ingeniería Hidráulica en México, V20, N°2, 2005.

WARREN, J.E., ROOT, P.J., The behaviour of naturally fractured reservoirs, Soc. of Petrol. Engrs. J., Vol. 3, 245-255, 1963

WHITE, W. B., Conceptual models for limestone aquifers: Groundwater 7 (3), 15-21, 1969. *En White, 2003.*

WHITE, W. B., Karst hydrology: recent developments and open questions, Engineering Geology 65, pp. 85-105, 2002.

WHITE, W. B., Conceptual model for karstic aquifer, Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 2003.

WHITE, W. B., WHITE, E. L., Ground water flux distribution between matrix, fractures, and conduits: constraints on modeling, Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 3 (2), 2005

WORTHINGTON, S.R., DAVIES, G.J., QUINLAN, J.F., Geochemistry of springs in temperate carbonate aquifers: recharge type explains most of the variation, Proceedings 5th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, Neuchatel, Switzerland, pp. 341–347, 1992. *En White 2003*

WORTHINGTON, S.R., FORD, D., Borehole tests for megascale channeling in carbonate aquifers, Proceedings, XXVI Congress of the International Association of Hydrogeologists, Edmonton, Alberta, June 5th - 9$^{th}$, 1995.

WORTHINGTON, S.R., FORD, D., & BEDDOWS P., Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution. Speleogenesis and Evolution of karst aquifers, 2000.

WORTHINGTON, S.R., Diagnostic hydrogeologic characteristics of a karst aquifer (Kentucky, USA), Hydrogeology Journal 17, pp. 1665-1678, 2009.